

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«Харьковский политехнический институт»

**А. А. Ларин**  
**Д. Ю. Журило**

**История теплотехники**  
**учебное пособие**

для студентов НТУ «ХПИ»

Харьков 2018

УДК [50 (091)+62]: [008+37]  
Л25

*Одобрено решением ученого совета Национального технического университета «ХПИ», протокол № 7 от 25.09.2018 г.*

Рецензенты: *Д. В. Бреславский*, д-р техн. наук, проф.  
(Национальный технический университет «ХПИ»)  
*В. Н. Скляр*, д-р ист. наук, проф. (Национальный  
технический университет «ХПИ»)

Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов машиностроительных специальностей технических вузов, изучающих курс истории науки и техники. Но в то же время он может быть также полезен студентам других специальностей, научным сотрудникам, аспирантам, и всем тем, кто интересуется историей развития науки и техники.

Л25 Ларин А. А. История теплотехники : учеб. пособие / А. А. Ларин, Д. Ю. Журило ; [Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т"]. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2018. – 125 с.

Навчальний посібник призначений для студентів старших курсів машинобудівних спеціальностей технічних вузів, які вивчають курс історії науки і техніки. Але в той же час він може бути також корисний студентам інших спеціальностей, науковим співробітникам, аспірантам, і всім тим, хто цікавиться історією розвитку науки і техніки.

УДК [50 (091)+62]: [008+37]

Ил. 69. Табл. 2. Библиогр.: 16 назв.

© А. А. Ларин, 2018

© Д. Ю. Журило, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	4
1. Роль энергетики в развитии производства .....	5
2. Первые шаги теплотехники. Создание паровой машины .....	11
3. Развитие термодинамики .....	23
4. Применение паровой машины на транспорте .....	30
5. Двигатели внутреннего сгорания – основной источник энергии в XX веке .....	81
6. Развитие турбиностроения. Переворот в энергетике .....	71
7. Танковое двигателестроение .....	97
Список литературы .....	124

## Предисловие

Теплотехника является важнейшей частью энергетики, которая, в свою очередь, является основой экономики. Поэтому история развития теплотехники представляет важнейшую часть истории науки и техники. Создание паровой машины вызвало промышленную революцию XVIII века. Паровая машин позволила человечеству использовать запасы энергии, которая была накоплена планетой за миллиарды лет ее существования. Это изобретение по своему значению в жизни человечества может сравниться только с освоением огня и созданием компьютера. Развитие производства на основе применения паровых машин вызвало также революцию на транспорте и подготовило почву для создания более экономичных и компактных тепловых двигателей.

В XX веке основным источником энергии становятся на транспорте двигатели внутреннего сгорания, а в энергетике паровые турбины. Город Харьков является крупнейшим мировым центром производства паровых и газовых турбин. Велики достижения харьковчан и в деле создания дизельных двигателей для танков и тепловозов. В указанных достижениях большую роль играют сотрудники и выпускники Харьковского политехнического института (сейчас НТУ «ХПИ»). Это также отражено в данном пособии.

Пособие предназначено для студентов машиностроительных специальностей старших курсов, освоивших такие курсы как математика, физика, теоретическая механика, сопротивление материалов, электротехника, теплотехника и др.

# **1. Роль энергетики в развитии производства**

## **1.1. Развитие производства и энергетический кризис XVII века**

На протяжении многих тысячелетий человечество обходилось естественными источниками энергии, а именно мускульной силой людей и животных, а также энергией воды и ветра. В период позднего средневековья на смену ремесленному труду приходит мануфактурное производство. В этот период производство в Европе строилось на основе цехов (гильдий ремесленников). Цехи устанавливали обязательные правила изготовления продукции, ее количество и номенклатуру. Цехам в городах принадлежало монопольное право производства и продажи большинства промышленных товаров. Это право должны были контролировать городские власти. Чтобы избежать конкуренции, цехи препятствовали совершенствованию способов производства.

Однако в XVII веке стало интенсивно развиваться промышленное производство в сельской местности, где не действовали цеховые ограничения. Издавна крестьяне после окончания летней страды занимались прядением, ткачеством, шитьем, выделкой кож и др., прежде всего, для собственных нужд, а также и на продажу. Торговый капитал дал новый импульс этому производству. В Англии, во Франции, а затем и в других странах все больше крестьян-надомников стали работать по заказу купцов-перекупщиков. Отдельные селения и даже целые местности стали специализироваться на конкретных видах производства. Скупщик постепенно превращался в организатора и координатора домашнего промышленного производства, которое приобретало характер рассредоточенного предприятия. Система рассеянных мануфактур была очень выгодна для купцов-предпринимателей, поскольку крестьяне-надомники имели собственные средства производства и помещения. К тому же труд крестьян, как правило, обходился намного дешевле труда городских рабочих. Так зародилось мануфактурное производство, которое к началу XVIII века получило большое развитие. Постепенно в сферу деятельности купцов-предпринимателей стало входить и городское цеховое ремесло.

В последней трети XVI – начале XVII века происходит буржуазная революция в Нидерландах, сыгравшая важную роль в развитии капиталистических отношений в протестантских странах. С середины XVII века (1642 – 1688) буржуазная революция разворачивается и в Англии, наиболее развитой в промышленном отношении европейской стране. Эти ранние буржуазные революции были подготовлены развитием мануфактурного производства.

Переход к мануфактуре способствовал быстрому росту производительности труда, поскольку производственный процесс был основан на его разделении. В свою очередь разделение труда вызвало потребность в рациональной организации производственных процессов, которая невозможна без привлечения современных достижений науки и техники.

Как раз в это время, в конце XVII – начале XVIII века наука переживает важнейший период своего становления – научную революцию. В этот период развивается естествознание, основанное на экспериментальных исследованиях и математическом описании явлений природы.

Наиболее быстрый рост промышленности в Европе наблюдался в первых буржуазных государствах – Голландии, Англии и Швеции, а также во Франции, где уже сложился буржуазный уклад. Наиболее развитой в промышленном отношении страной Европы была, безусловно, Англия. Именно в ней и были сделаны все изобретения в области паровой техники.

Важнейшую роль в экономике Англии играло производство шерстяных тканей. Сукно было важнейшим предметом экспорта. Но при этом его производство было распределено среди большого количества мелких предприятий и носило кустарный характер. Что касается механизации, то только некоторые операции, а именно ворсование и валяние сукна производились на небольших водяных мельницах. В XVII веке наряду с кустарными мастерскими возникают первые капиталистические предприятия с десятком ткацких станков. Для приведения их в движение использовалась либо энергия воды, либо мускульная сила животных.

Другой важной отраслью промышленности Англии была металлургия, в основном производство чугуна и его переделка в железо и сталь. В середине XVIII века в Англии была освоена выплавка чугуна с применением каменноугольного кокса. В конце XVIII века были

получены также и методы переработки чугуна с применением кокса в железо с помощью пудлингования и сталь с помощью тигля. Все это произвело переворот в области черной металлургии и вызвало увеличение производство металла. Это, в свою очередь, потребовало увеличения добычи руды и стали. Откачка воды из шахт, процесс плавки, в частности дутье воздуха в печь, прокатка железа в процессе пудлингования требовали применения мощных машин с непрерывным вращением, что не всегда могли обеспечить водяные колеса.

Третьей областью, нуждавшейся в мощном источнике энергии, была гидравлика, а именно различные водоподъемные сооружения. Они обслуживали не только фонтаны, но и системы судоходных каналов, и доки для больших кораблей.

Мануфактурное производство, возникшее в конце XVII века и основанное на применении мускульной силы животных, а также энергии воды и ветра уже в скором времени зашло в тупик. Дальнейшее развитие промышленности тормозилось отсутствием источников энергии. Выход заключался в развитии тепловой энергетики, т.е. использовании энергии сгораемого топлива.

## **1.2. Создание паровой машины и промышленная революция XVIII века**

Промышленная революция XVIII века, вызвавшая прогресс механики, связана, прежде всего, с появлением и развитием паровой машины. Академик Российской АН Н. Н. Моисеев ставит это изобретение в один ряд с освоением человеком огня и созданием ЭВМ [12, с. 19]. Никакие другие достижения человечества: ни приручение домашних животных, ни изобретение колеса, ни достижения биологии и медицины, ни электрификация, ни развитие транспорта и авиации, ни освоение космоса и атомной энергии не повлияли так на развитие человечества. Применение паровых машин вывело его из энергетического тупика, вызванного ограниченностью естественных источников энергии (мускульная сила человека и животных и энергия ветра и рек) и создала предпосылки для дальнейшего развития промышленности, энергетики и транспорта. Хотя паровые машины, по сравнению с другими, более поздними тепловыми машинами, имеют ряд недостатков, основными из которых являются низкий КПД и длительный процесс подготовки к работе (разогрев котла), именно они

открыли для человечества эру машинного производства. В конце XVIII – начале XIX веков паровая машина, как универсальный двигатель, заняла ключевые позиции в обрабатывающей и добывающей промышленности и начала быстро распространяться на транспорте. Развитие производства на основе применения паровых машин позволило создать достаточно точные станки и подготовило почву для создания более экономичных и компактных тепловых двигателей.

В самом конце XVII века были созданы паровые насосы, успешно применявшиеся для подъема воды. Для приведения в движение различных машин на фабриках применялись гидравлические двигатели, вода для которых накачивалась с помощью паровых насосов. О применении этих насосов в качестве двигателей транспортных средств, естественно, речь не могла идти.

Только в конце XVIII века Джеймс Уатт создал универсальный паровой двигатель – паровую машину с непрерывным вращением. Несмотря на низкую эффективность по сравнению с другими тепловыми двигателями, именно она является одним из трех самых важнейших достижений человека. Хотя устройство механизма паровой машины более сложное по сравнению с паровой турбиной, она значительно проще в изготовлении и не требует таких знаний в области теплотехники и применения специальных сплавов для изготовления, как паровые турбины и тем более, газовые турбины и двигатели внутреннего сгорания. Именно применение паровых машин вывело человечество из энергетического тупика и создало условия для бурного развития промышленного производства.

Создание паровой машины вызвало промышленную революцию XVIII века. Произошло это именно в Великобритании не случайно. Англия была мировым промышленным и торговым лидером, владела обширными колониями, поэтому располагала огромными финансовыми ресурсами. Кроме того, государство не подавляло экономическую активность.

Промышленная революция (промышленный переворот, великая индустриальная революция) – это переход от ручного труда к машинному, от мануфактуры к фабрике, от аграрной экономики к индустриальному производству. Промышленный переворот происходил в разных странах не одновременно, но в целом можно считать, что период, когда происходили эти изменения, начинался от второй



половины XVIII века и продолжался в течение XIX века. Характерной чертой промышленной революции явился стремительный рост производительных сил на базе крупной машинной индустрии и утверждение капитализма в качестве господствующей мировой системы хозяйства. Важной составляющей промышленного переворота было внедрение в транспорт и производство рабочих машин и механизмов, которые заменили ручной труд.

Первая половина XIX века время триумфального шествия паровой машины. Паровая машина, первоначально служившая водяным насосом, была приспособлена для дутья в горнах,ковки железа, а также для замены водяного колеса в силовых установках. Машинная индустрия, основанная на паровом двигателе, как источнике энергии, охватывала все новые и новые отрасли промышленности. На смену гужевому транспорту пришли железные дороги и паровые автомобили и тракторы, паровые машины на водном транспорте вытесняли паруса и весла.

Механизация коснулась и ткацкой промышленности, сохранявшей в начале XIX века свое ведущее положение. Ткацкие станки уже рассчитаны на применение парового двигателя. В 1804 г. **Жозеф Мари Жаккар** (1752 – 1834) создал ткацкий станок с программным управлением, способный автоматически ткать узорчатую ткань. Управление впервые осуществлялось с помощью перфокарт. В 1825 – 1830 гг. английский механик **Ричард Робертс** изобрел автоматическую прядильную машину. Механизируют и труд швеи, появляется множество вариантов швейных машинок, самой удачной из которых становится машинка американца **Исаака Меррита Зингера**, изобретшего для нее челнок.

Внедрение точных станков не только повысило производительность труда, но и позволило использовать труд менее квалифицированных рабочих и тем самым расширять производство. В военном деле внедрение высокоточных станков позволило перейти к нарезному, а позднее и казнозарядному оружию.

В течение XIX века происходят огромные сдвиги в развитии техники. Строятся железные дороги, стальные паровые суда, крупные предприятия – фабрики и заводы. В промышленности внедряются

новые эффективные методы производства стали, бурно развивается химическое производство.

### **1.3. Развитие теплотехники и вторая промышленная революция**

К концу XIX века происходит переворот в энергетике. Развитие теории теплотехники и технологии машинного производства позволяет создать более совершенные, чем паровые машины, тепловые двигатели – паровые турбины и двигатели внутреннего сгорания.

Стремительными темпами развивается добывающая промышленность. К концу XIX века США заняли первое место в мире по добыче угля – основного источника энергии в то время. Они также обошли Англию по выплавке чугуна и стали. В 50-е гг. начинается добыча нефти. В начале XX века США добывали больше половины медной руды мира, вышли на первое место по добыче нефти и цинка. В 90-е гг. развиваются новые отрасли промышленности – химическая и электротехническая, зарождается турбиностроение и автомобильная промышленность. По численности выпускаемых машин, их распространению и качеству Америка значительно превосходит все европейские страны, включая Англию. Иногда этот период называют второй промышленной революцией.

Совершенствование ДВС и паровых турбин, автомобилей и самолетов и т.д. потребовало привлечения научных знаний. В 1940-е гг., в первую очередь для военных целей, появляются совершенно новые отрасли промышленности: атомная, ракетостроение, реактивная авиация. Все это уже требует проведения качественно новых видов расчетов. Совершенствующиеся технологические процессы также уже не могут управляться человеком. Одним словом, человечество опять зашло в своем развитии в тупик – на этот раз информационный.

Выходом из этого тупика стало создание цифровых электронных вычислительных машин (ЭВМ). С внедрением ЭВМ началась научно-техническая революция. Применение ЭВМ позволило проводить более точные расчеты при проектировании и доводке многих видов техники, в том числе и тепловых машин. Это вывело теплоэнергетику на качественно новый уровень развития.

## 2. Первые шаги теплотехники

### Создание паровой машины

#### 2.1. Зарождение теплотехники

Первое практическое применение тепловой энергии принадлежит величайшему изобретателю всех времен и народов Герону Александрийскому, жившему в I веке нашей эры. Геронов шар – золипил (в переводе с греческого «шар Эола – бога ветров») стал прообразом реактивной паровой турбины. Он представлял собой полый металлический шар с впаянными в него на противоположных полушариях двумя Г-образными патрубками-соплами. Шар мог вращаться в трубчатых опорах. По трубкам, играющим роль осей, поступал в шар от котла, установленного под шаром. Затем он вырывался из трубок, создавая реактивные силы, под действием которых достаточно быстро вращался. Построенный современными учеными по чертежам Герона золипил развивал до 3500 оборотов в минуту!

Но вклад Герона в развитие теплотехники не ограничивается золипилом, на его счету есть и различные автоматические устройства, работающие под действием давления горячего воздуха или пара. Так устройство для автоматического открывания дверей храма по существу является прообразом паровых насосов Севери.



Рис. 2.1. Геронов шар

Приспособление Герона для автоматического открывания дверей храма. Работало оно так. Огонь, зажженный в бронзовом жертвеннике, вызывает расширение воздуха в сосуде, заполненном водой. В результате вытесненная вода по сифону переливается в бак, служащий противовесом. Он становится тяжелее, опускается и поворачивает двери на петлях. После остывания жертвенника воздух в сосуде разрежается, и вода перетекает в него обратно, а двери храма закрываются.

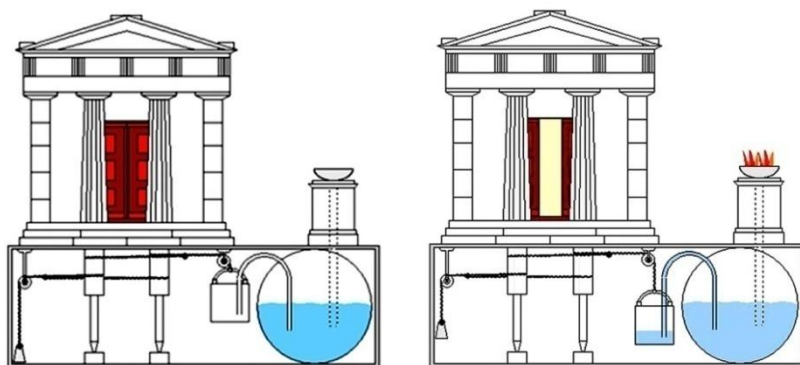


Рис. 2.2. Устройство Герона Александрийского для автоматического открывания дверей храма

Однако все изобретения Герона Александрийского, основанные на использовании энергии тепла остались почти невостребованными. Низкий уровень науки и техники и отсутствие потребности в тепловом двигателе у рабовладельческого общества остановили разработку тепловых машин более чем на полтора тысячелетия. Однако сочинения Герона, особенно «Пневматика» и «Театр автоматов», в которых описаны многие приборы, основанные на давлении воздуха или пара послужили в XVII веке изобретателям первых паровых насосов.

Но в XVII веке, когда началось бурное развитие горнодобывающей, металлургической, металлообрабатывающей, станкостроительной и других отраслей производства возникла острая потребность в значительно более мощных источниках механической энергии, чем мускульная сила людей и животных, энергия воды и ветра. Внимание изобретателей обратилось к движущей силе пара или огня. Многие ученые и изобретатели занимались созданием паровых двигателей и насосов. Среди них можно отметить **Джероламо Кардано** (1501 – 1576), Филиберто Делонга, **Саломона де Ко** (1576 – 1630) и маркиза Ворчестера.

Так в сочинении французского архитектора Саломона де Ко (1615 г.) говорится о возможности подъема воды посредством действия огня. В 1629 г. итальянский математик и инженер Джованни Бранка предложил проект турбины в виде укрепленного на вертикальной оси диска с лопатками, вращаемого струей пара, которая подводилась по касательной к диску. Турбина Бранка предназначалась для привода ткацких станков, однако вследствие малой

производительности и очень низкой экономичности она не получила промышленного применения. В дальнейшем принцип работы колеса Бранка лег в основу активных паровых турбин.

Применение паровых турбин являлось очень заманчивым, так как в них сразу получается равномерное вращательное движение ротора, и нет необходимости в механизмах, преобразующих поступательное движение поршня во вращательное вала, как это происходит в паровых машинах и ДВС. Однако изготовление паровой турбины возможно только при высоком уровне технологии, наличии специальных материалов и методов очень точной обработки металлов. Кроме того, создание паровой турбины требует знания свойств пара и законов его истечения. Без всего перечисленного КПД паровых турбин находился на чрезвычайно низком уровне, и они могли играть только роль занимательных игрушек.

По этим причинам изобретатели занялись созданием более простой в изготовлении поршневой паровой машины. Открытие атмосферного давления и научно поставленные опыты Э. Торричелли, Б. Паскаля и О. фон Герике побудили использовать его в качестве движущей силы. Для этого необходимо было создать в цилиндре, снабженном поршнем разрежение. Поршень в этот момент должен находиться в крайнем положении и совершить ход под давлением воздуха. Это и легло в основу создания атмосферных машин.

Первые предложения таких машин принадлежат аббату **Готфрейлю** и **Х. Гюйгенсу** (1681). Для создания разрежения они намеревались использовать не пар, а взрывы пороха внутри рабочего цилиндра и считаются пионерами, выдвинувшими идею ДВС.

**Дени Папен** (1647 – 1712), работавший у Гюйгенса ассистентом, убедился в опасности и неудобстве использования пороха и предложил осуществлять разрежение с помощью водяного пара. В 1690 году в Марбурге он создал паровой двигатель, который совершал полезную работу за счет нагревания и конденсации пара. Вода в цилиндре при нагревании превращалась в пар и двигала поршень вверх. Через специальный клапан пар выталкивал воздух, а при конденсации пара создавалось разреженное пространство и наружное давление двигало поршень вниз. Опускаясь, поршень тянул за собой веревку с грузом. Такие машины, в которых поршень возвращается в исходное положение под действием атмосферного давления, получили название пароатмосферных.

Двигатель Папена не мог осуществить непрерывное действие. Чтобы заставить поршень поднимать груз, необходимо было манипулировать стержнем-клапаном и стопором, перемещать

источник пламени и охлаждать цилиндр водой. Недостатком машины Папена было также объединение в цилиндре функций котла, цилиндра и конденсатора. А заслугой Папена является изобретение парового котла, снабженного предохранительным клапаном, позволяющим регулировать давление пара.

Из всех проблем, стоящих перед изобретателями, наиболее острой была задача подъема воды, в частности откачка воды из шахт, глубина которых становилась все больше, а также перекачка воды в гидротехнических сооружениях. Первым успеха добился английский механик и изобретатель **Томас Севери** (1650 – 1715). В 1698 году он изобрел работающий без поршня паровой насос, предназначенный для откачки воды из шахт. Не случайно насос получил название «друг рудокопов».

Севери отделил котел от сосуда, где производилась конденсация. Его паровой насос состоял из парового котла и рабочего цилиндра. У машины было два рабочих цикла: цикл всасывания и цикл выталкивания.

Всасывание воды происходило путем конденсации пара и создания разреженного пространства над уровнем воды в сосуде. Для этого кран во всасывающей трубе открывают, а кран подачи пара и кран в напорной трубе закрывают. Затем рабочий цилиндр обливают холодной водой, и пар, находящийся в нем, начинает конденсироваться. В рабочем цилиндре создается разрежение, и в него из шахты под действием атмосферного давления поступает вода.

На цикле выталкивания рабочий обслуживающий насос открывает кран в напорной трубе и закрывает кран в подающей трубе, после чего открывает паровой кран. Вода выталкивается из рабочего цилиндра под давлением пара. Высота подъема воды зависит от давления пара, и фактически ограничивается механической прочностью всех систем. Обычно она не превышала 30 м, поэтому в глубоких шахтах приходилось ставить одну машину над другой. Несмотря на то, что эта паровая машина стоила дорого, угрожала взрывом и обладала низкой экономичностью, она нашла широкое применение для снабжения водой городов, осушения болот и лугов. А главное ее назначение – откачивание воды из шахт и рудников.

Машина Севери описана в сочинении «Друг рудокопов». Однако ее применение вызвало большие затруднения именно для рудников. Высота всасывания была не более 10 метров, что вынуждало размещать машину на большой глубине. Нагнетание воды обычно не превышало 30 м, так как давление пара выше 3 атм представляло большую опасность. Указанные обстоятельства заставляли в глубоких

шахтах размещать одну машину над другой, а из-за невысокой производительности приходилось параллельно размещать по несколько машин.

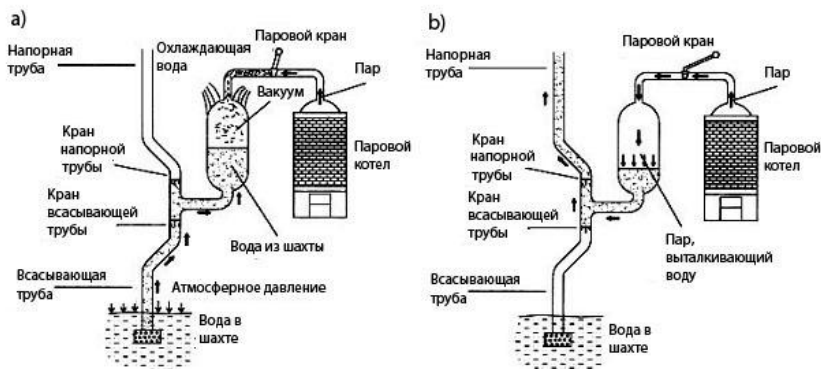


Рис. 2.3. Схема работы парового насоса Томаса Севери.

а – цикл всасывания, б – цикл выталкивания

Впоследствии паровая машина Севери была значительно усовершенствована **Джоном Теофилом Дезагюлье** (1683 – 1744). Он предложил для конденсации пара впрыскивать воду внутрь цилиндра. Это позволяло значительно сократить время на конденсацию пара, и машина Севери стала работать значительно быстрее. Кроме того Дезагюлье внедрил предохранительный клапан и двухходовой распределительный кран. Машины, усовершенствованные Дезагюлье, строились до начала XIX века.

Более радикально проблему откачки воды из шахт решил **Томас Ньюкомен** (1663 – 1729). Он принимал участие в установке машин Севери и прекрасно знал их недостатки. Машина, созданная им в 1707 г., представляет собой искусную комбинацию идей Севери и Папена. В ней пар, как у Севери, приготавливался в отдельном котле, а поршневой двигатель был отделен от откачивающего воду поршневого насоса, как это было у Папена. Система клапанов регулировала поступление пара и воды в цилиндры. Эти машины широко применялись, имели потрясающую надежность и служили по сто лет и более. Последняя машина Ньюкомена была демонтирована в Англии в 1934 г.

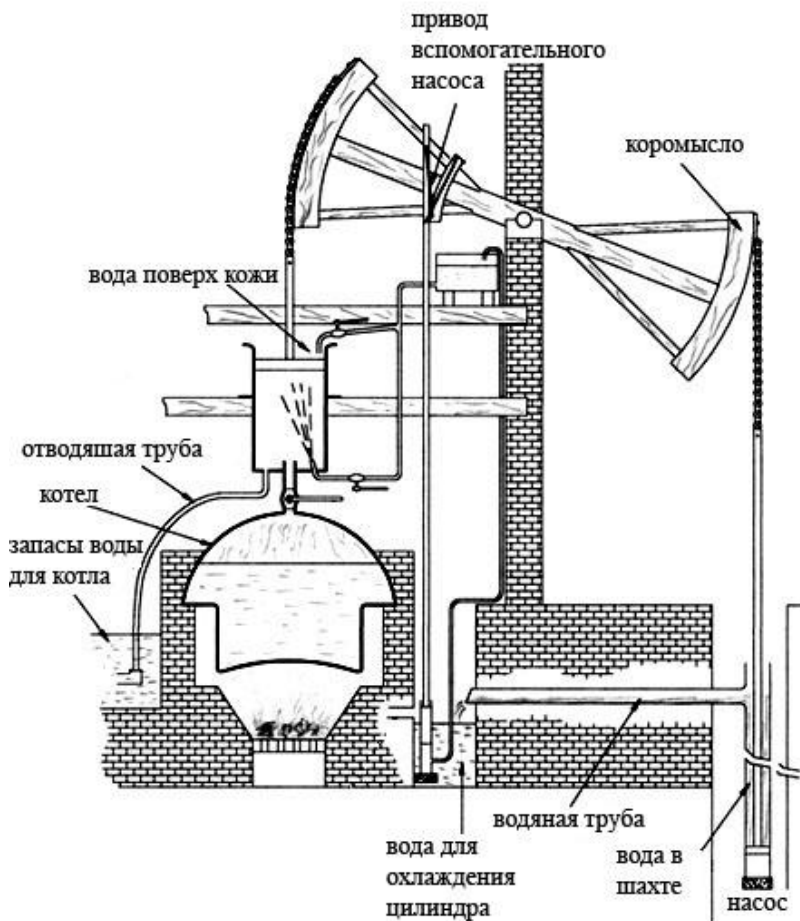


Рис. 2.4. Схема работы пароатмосферной машины Томаса Ньюкомена

Существенные улучшения в пароатмосферные машины Ньюкомена внес **Джон Смитон** (1724 – 1792). Он первым поставил создание этих машин на научную основу. Были выработаны методы их испытаний и внедрены более рациональные методы расчета. Котлы подбирались с достаточной производительностью, а более качественное изготовление цилиндра и поршня уменьшало потери пара. Особое внимание Смитон уделял выбору материалов для



изготовления машин. Он создал также прибор для регулирования рабочих ходов, а соответственно и мощности машины.

Главным недостатком пареоатмосферных машин является большое потребление топлива. Другим недостатком было качательное прямолинейное движение, передаваемое рабочему органу. В то же время промышленность и транспорт все более остро нуждалась в универсальном двигателе, дающим непрерывное вращательное движение и не зависящем, как водяные колеса, от места или, как ветряные двигатели, от погоды.

В 1763 г. русский инженер **Иван Иванович Ползунов** (1730 – 1766) предложил, а к 1766 г. построил на Барнаульском горном заводе машину с непрерывным движением. Она работала на угле, холостой ход исключался с помощью двух цилиндров, работавших на общий вал, парораспределение было автоматическим, правда, машина оставалась пареоатмосферной. Изобретатель умер до пуска машины, которая после небольшой неполадки была остановлена и забыта, хотя за короткое время работы не только себя окупала, но и принесла большую прибыль.

## **2.2. Создание универсальной паровой машины**

Исправить создавшееся положение могло только коренное изменение принципов работы машины. Слава создания первого универсального паропоршневого двигателя досталась шотландскому инженеру, изобретателю-механику **Джеймсу Уатту** (1736 – 1819). В 1763 – 1764 гг. он занимался ремонтом машины Ньюкомена, принадлежавшей университету Глазго. Изобретатель был поражен большим расходом пара и произвел ряд опытов для изучения его свойств. На основании этих опытов Уатт правильно объяснил низкий КПД охлаждением цилиндра на каждом цикле работы машины и его последующим нагревом до температуры впускаемого пара.

Первым крупным усовершенствованием паровой машины, сделанным Уаттом, стало внедрение отдельного конденсатора. При этом цилиндр сохранялся все время горячим и даже изолировался деревом или другим материалом, плохо проводящим тепло. В 1769 г. Уатт получил патент на усовершенствования ньуюкоменовской водоподъемной машины.

Однако дело постройки машины из-за финансовых и других трудностей не продвигалось, пока за него в 1773 г. не взялся новый инвестор **Мэттью Болтон** (1728 – 1809). В результате в 1774 г.

машина была построена. Ее испытания показали хорошие эксплуатационные качества машины и в два раза меньший расход топлива по сравнению с лучшими машинами Ньюкомена.

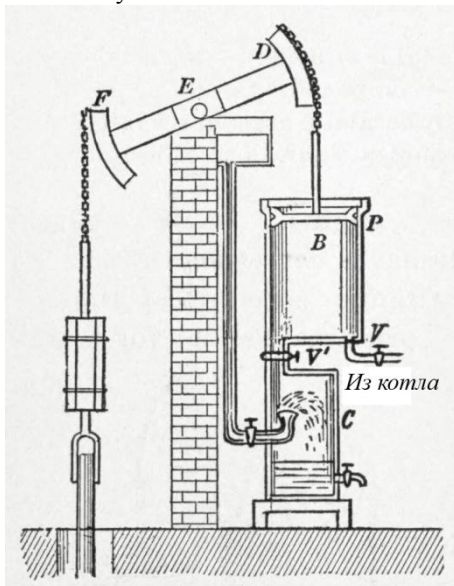


Рис. 2.5. Машина Ньюкомена с конденсатором Уатта

В 1777 г. Уатт построил машину, в которой применил при подаче пара отсекку с целью его расширения. Это снижало мощность машины, но повышало ее экономичность. В 1782 г. Уатт взял патент на свое изобретение, однако оно не сразу нашло применение на практике в силу отсутствия достаточно подготовленных машинистов. К 1780 г. окончательно выработался тип машины Уатта простого действия.

Тогда же изобретатель занялся более важным вопросом – созданием машины с непрерывным вращением. Поскольку применение кривошипно-шатунного механизма в паровых машинах было защищено патентом, Уатт применил балансир и планетарную передачу. Для обеспечения непрерывного хода он также ввел двойное действие (пар поочередно поступал сверху и снизу поршня), золотниковое парораспределение, маховое колесо. В 1784 г. Уатт конструирует двухцилиндровую машину.

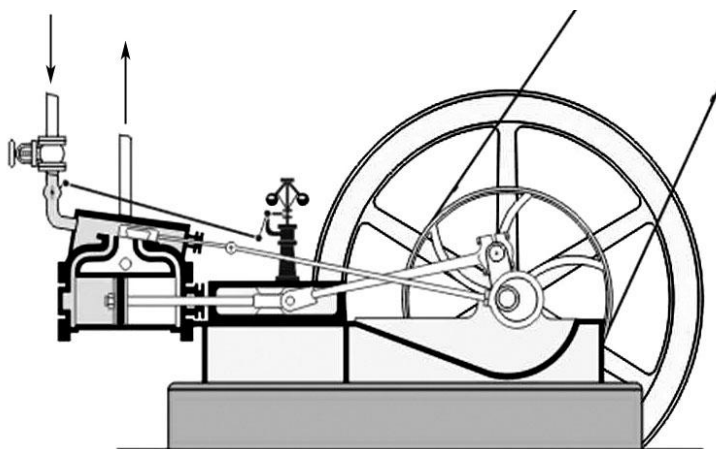


Рис. 2.6. Универсальная паровая машина Джеймса Уатта

Для режима автоматического поддержания работы машины Уатт в 1788 г. предложил центробежный регулятор оборотов. Это одно из важнейших его изобретений. Центробежные регуляторы и в настоящее время являются обязательной принадлежностью любого ДВС или турбины.

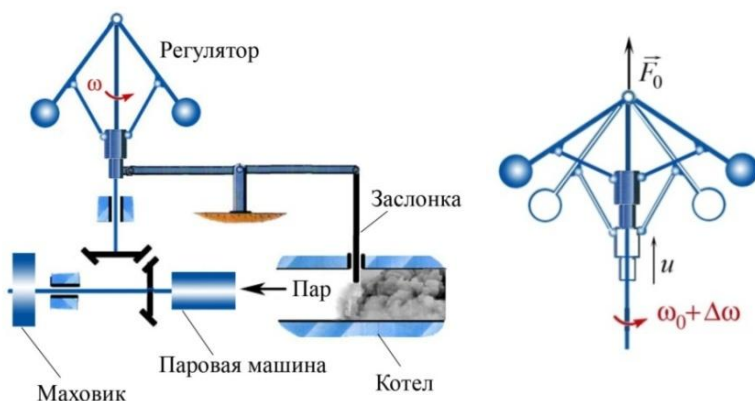


Рис. 2.7. Схема системы регулирования паровой машины Уатта и принцип работы центробежного регулятора

### 2.3. Распространение машин Уатта

Машины Уатта получили широкое признание. Если за 70 лет (с 1699 по 1769 гг.) пареоатмосферных машин было изготовлено около 140, то за 10 лет (с 1775 по 1785 гг.) машин на заводе Болтона – Уатта выпущено 66 единиц. Создание Уаттом машин двойного действия с непрерывным вращением способствовало еще более быстрому их распространению. Наибольшее применение они нашли в хлопчатобумажной промышленности, где к 1800 году было поставлено 84 машины общей мощностью 1382 л. с.\* На втором месте стоит металлургия, включая рудники, угольные копи, литейные и металлообрабатывающие заводы (80 машин общей мощностью 1438 л. с.) и, наконец, водоподъемные машины, обеспечивающие водопроводы и каналы (31 машина, 502 л. с.). В XIX веке темпы строительства паровых машин выросли на порядок. В 1826 г. в Великобритании насчитывалось уже 1500 машин общей мощностью 80 000 л. с.

Производство паровых машин было не только большим достижением в области энергетики. Это был шаг вперед и в машиностроении. При проектировании новых машин Уатт пользовался выработанными им эмпирическими формулами. Кроме того завод Болтона – Уатта стал первым в мире специализированным заводом. На нем с самого начала стремились к возможно более точному изготовлению деталей. Это в основном заслуга М. Болтона, который выработал правила производства деталей и внедрял их не только у себя, но и на других заводах, изготавливающих комплектующие паровых машин. В 1779 г. была выработана инструкция по сборке машин с рисунками и подробным порядком установки каждой ее части. В 1784 г. появляются и правила по уходу за машиной непрерывного вращательного движения.

Машины Уатта в небольшом количестве поставлялись на экспорт, но уже в 1780 г. их производство начинается во Франции, на рубеже XIX века – в Германии и Северо-Американских Соединенных Штатах, а в 1818 г. в Бельгии.

В XIX веке паровые машины находят широкое применение не только в промышленности, но и на транспорте. Следует отметить, что пока не была создана универсальная паровая машина Уатта, все попытки построить судно или наземное транспортное средство,

---

\* В данном пособии мощность машин указывается в лошадиных силах. Однако это внесистемная единица. Для перевода мощности в киловатты (кВт) следует умножить показатель в л. с. на 0,7355.

движимое силой пара, либо оставались на бумаге, либо приводили к неудаче.

В конце XVIII века были созданы прообразы паровых автомобилей и тракторов. В начале XIX века был создан паровой автомобиль Ричарда Тревитика. Он же первым в 1803 году создал паровоз. В США был создан первый пароход, имевший коммерческий успех. Судно Роберта Фултона под названием «North River Steamboat of Clermont» (в литературе его обычно неправильно называют «Клермонт») совершало регулярные рейсы по реке Гудзон между Нью-Йорком и Олбани с 1807 г. Вскоре после этого не только в Соединенных Штатах, но и в Англии, и в других странах развернулось строительство пароходов.

Больших успехов достигло строительство паровых машин в США. Развитие американских машин с самого начала пошло по пути, отличному от европейского. Уже в конце XVIII века там создается машина высокого давления Эванса. В начале XIX века в США строятся оригинальные пароходные машины, а в 1830-х гг. – паровозы, существенно отличающиеся от европейских.

Хотя Дж. Уатт указывал на необходимость расширения пара в цилиндрах машины, устройства парораспределения были весьма несовершенны. В конце 1840-х гг. в США появляется новый тип паровых машин изобретателя Джорджа Генри Корлисса. В 1849 и 1851 гг. он получил патенты на устройство впускного и выпускного клапанов, которые существенно повышали КПД паровой машины. Новая система парораспределения основывалась на применении вращающихся кранов с изменением степени наполнения непосредственно от регулятора. Благодаря ей и очень качественному исполнению машин, они отличались малым расходом пара и высокой равномерностью хода. Большое внимание Корлисс уделял также котельной установке, применяя сухой перегретый пар.

Большое значение для изучения динамики кривошипно-ползунного механизма паровой машины имела монография австрийского инженера **Иоганна Радингера** (1842 – 1901) «О паровых машинах с высокой скоростью поршня», в которой был приведен графический расчет действия сил в этом механизме.

К концу XIX века паровые машины достигли своего расцвета, к этому моменту в них были внедрены почти все крупные усовершенствования, и они стали вытесняться другими двигателями. На крупных электростанциях и больших кораблях паровые машины заменялись паровыми турбинами, а на малых станциях и мелких судах – двигателями внутреннего сгорания, в основном дизелями.

Дальнейшее развитие паротурбостроения обеспечило человечество дешевой электроэнергией и создало возможности для электрификации на производстве и в быту. Появление быстроходных и мощных ДВС позволило создать автомобиль и самолет, произвести революцию на транспорте. Однако паровые машины по-прежнему применялись в локомотивах (до середины XX века паровоз был основным видом локомотива), на металлургических и горных заводах, где еще не была проведена электрификация, в мелких установках с утилизацией топлива, например, локомотивы. На большинстве грузовых судов также преобладали паровые машины. Так, в 1930 г. ими были оснащены 74,7 % всемирного торгового флота.

Подробнее с историей развития паровых машин можно ознакомиться в книге А. А. Радцига «История теплотехники» [13].

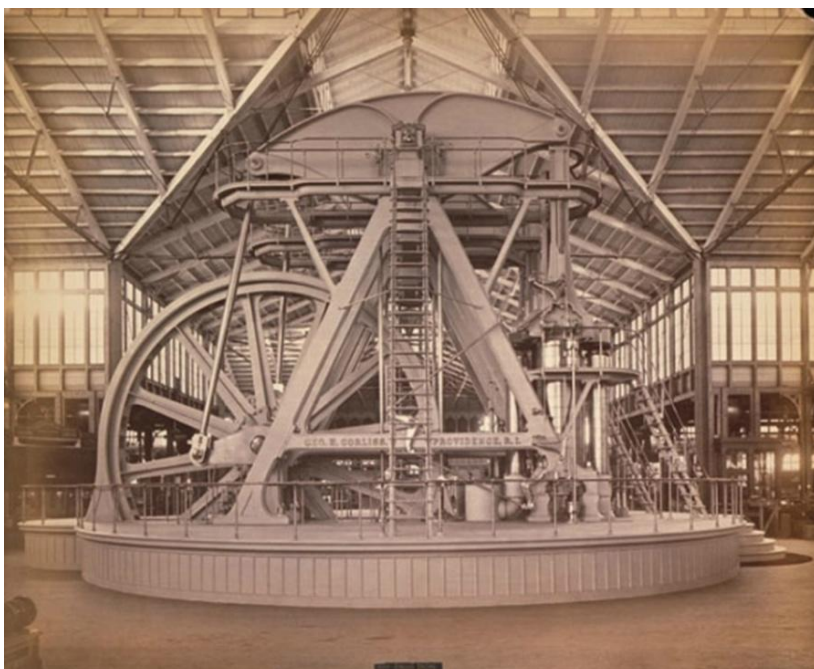


Рис. 2.8. Паровая машина Корлисса. На Выставке Столетия в Филадельфии в 1876 г. от нее приводились в действие все экспонаты Машинного павильона. Мощность машины 2500 л. с., высота 13,5 м, масса 607 т.

### 3. Развитие термодинамики

#### 3.1. Развитие науки в XIX веке

Следует отметить, что на протяжении более чем 100 лет паровые машины строились без соответствующей теории. Успехи паровых двигателей не дают покоя многочисленным изобретателям. Число изобретений различных типов двигателей быстро растет, предлагается немало и «вечных двигателей». Рассмотрение последних настолько отвлекало ученых, что в 1775 году, за 70 лет до установления закона сохранения энергии и за 90 лет до открытия второго начала термодинамики, Парижская Академия наук первой в мире принимает решение их больше не рассматривать.

Ученые и философы с древнейших времен интересовались тепловыми явлениями, но кроме общих представлений, которые в большинстве случаев носили фантастический характер, ничего высказано не было. В античные и средневековые времена считалось, что носителями тепла в теле является невесомое вещество, позднее получившее название теплород (флогистон). В противовес теории теплорода в трудах **Френсиса Бэкона** (1561 – 1626) зарождается теория о кинетической природе тепла, в рамках которой теплота представляется как определенный вид движения частиц. Понимание связи между действием огня и механической работой паровой машины в некоторой степени помогало первым изобретателям.

Однако представления о природе тепла еще долго оставались предметом споров. Шотландский химик **Джозеф Блэк** (1728 – 1799), изучая природу теплоты, установил, что различные виды вещества нагреваются в разной степени одним и тем же количеством теплоты. В результате он выявил теплоемкость различных видов вещества. Блэк установил, что при таянии льда и снега в течение определенного времени они поглощают тепло, не становясь при этом теплее. Это позволило ему обнаружить скрытое (латентное) состояние теплоты. При этом Блэк также понимал теплоту как некую материальную субстанцию, которую великий химик **Антуан Лоран Лавуазье** (1743 – 1794) назвал теплородом. Попытки взвесить ее оказались неудачными, поэтому теплоту стали рассматривать как особого рода невесомую неуничтожаемую жидкость, способную перетекать от нагретых тел к холодным. Лавуазье считал, что подобная концепция была в полном

соответствии с его идеей получения теплоты с помощью химических соединений. Увлечение этой концепцией оказалось столь велико, что она продержалась до середины XIX века, и кинетическая теория теплоты отступила на второй план, несмотря на то, что ее разделяли Ньютон, Гук, Бойль, Д. Бернулли и Ломоносов.

Учение о тепловых явлениях начало развиваться после примерно в XVIII веке после изобретения термометра. С этого времени стали возможны количественные тепловые измерения, доведенные до высокой степени точности в опытах Лавуазье и Лапласа. Однако основные количественные понятия теплофизики выкристаллизовались не сразу, существовала немалая путаница в таких понятиях, как «количество теплоты», «степень теплоты», «градус теплоты».

XIX век является веком триумфального шествия паровой машины. Она стала не просто главным, а практически единственным двигателем в промышленности и на транспорте. Однако паровые машины имели очень низкий КПД, и их дальнейшее совершенствование требовало развития теоретических основ теплотехники. При этом конструкторы паровых машин, в том числе и Дж. Уатт, пользуются эмпирическими данными.

В первой четверти XIX века было издано две крупных теоретических работы в области термодинамики. Первая – это работа **Жана Батиста Фурье** (1768 – 1830) «Аналитическая теория тепла» (1822), которая содержала математическую теорию теплопроводности. Вторая работа теоретического характера была выполнена **Садом Карно** (1796 – 1832). Его труд «Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу» (1824) стал первым фундаментальным трудом по теории теплотехники. Французский инженер предсказал, что тепловым машинам «суждено совершить большой переворот в цивилизованном мире», и задался целью определить причины их несовершенства. В своем труде Карно заложил основы термодинамики, поскольку там содержались (хотя и полученные с помощью теории теплорода) и оба начала термодинамики, и ее основные понятия, и идеальный цикл тепловых машин, и другие важные положения. Основоположник термодинамики предлагает рабочий цикл четырехтактного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), соответствующий четырем ходам поршня: 1-й – всасывание воздуха;



2-й – сжатие его, в конце которого происходит подача и сгорание топлива; 3-й – расширение газообразных продуктов сгорания, т.е. рабочий ход; 4-й – выпуск отработавших газов.

Работа Карно прошла почти незамеченной. И лишь через 10 лет, после издания «Мемуара о движущей силе теплоты» Б. Клапейрона, она стала почти сенсацией. Клапейрон «перевел» ее на математический язык, вскрыв великое содержание этого труда, и первым применил графический метод исследования работы тепловых машин – метод циклов.

В 1845 – 1847 гг. трудами Р. Майера, Д. Джоуля, Г. Гельмгольца окончательно формулируется закон сохранения и превращения энергии – первое начало термодинамики. Недоверие к новому закону быстро рассеивалось благодаря трудам В. Томсона (лорда Кельвина), Р. Клаузиуса, У. Ренкина и др.

В 1855 – 1865 гг. Рудольф Клаузиус (1822 – 1888) вводит понятия обратимых и необратимых процессов и энтропии – величины, рост которой в необратимых процессах характеризует ту часть энергии тел, которая не может быть превращена в работу, а рассеивается в виде теплоты. Поскольку все реальные процессы вследствие трения, теплопроводности и конечности времени их протекания необратимы, энтропия изолированных систем всегда возрастает. Эту формулировку второго начала термодинамики Клаузиус без должных оснований распространил на Вселенную, объявив о неизбежности ее «тепловой смерти». Это означало, что когда-то вся энергия, имеющаяся на Земле и в других частях Вселенной, превратится в тепло, а равномерное распределение последнего между телами земной природы и Вселенной приведет к выравниванию температуры и к полному прекращению превращений энергии. Однако эта теория не учитывает бесконечности Вселенной, в которой процессы рассеивания и концентрации энергии должны чередоваться и во времени, и пространстве. Этим объясняется наличие запасов энергии на Земле и в Солнечной системе. Кроме того, австрийский физик Л. Больцман, один из творцов молекулярно-кинетической теории газов, доказал, что закон возрастания энтропии неприменим к Вселенной еще и потому, что он справедлив лишь для статистических систем, состоящих из большого числа хаотически движущихся частиц, поведение которых подчиняется законам теории

вероятностей. Для них возрастание энтропии лишь наиболее вероятно, но с необходимостью должно наступать и маловероятное событие – ее уменьшение. Во Вселенной же действуют динамические законы.

В 1857 г. зародилась статистическая физика, когда была опубликована работа Клаузиуса «О роде движения, которое мы называем теплотой». Клаузиус предложил модель идеального газа. Он рассматривал теплоту как движение атомов и молекул. В газе молекулы участвуют в поступательном, вращательном движении, а также могут обладать внутренним движением частей молекулы. Им была выведена формула для определения давления, оказываемого молекулами на стенки сосуда. Им были рассмотрены такие явления как кипение, конденсация газов, он указывал на возможность подсчета скорости газовых молекул какого-либо газа при данной температуре и сам произвел такой расчет. Клаузиус является основоположником кинетической теории газов.

Большой вклад в развитие кинетической теории внес Джеймс Клерк Максвелл (1831 – 1879). В работе «Пояснение к динамической теории газов» он впервые выводит закон распределения молекул газа по скоростям, рассматривает вопросы о длине свободного пробега молекул газа, о внутреннем трении и о диффузии газов, а также затрагивает вопрос о молекулярном толковании теплоемкости газов. Таким образом, Максвелл одним из первых вводит в физику статистические представления и показывает статистическую природу второго начала термодинамики. Он также получил ряд важных результатов в молекулярной физике и термодинамике (термодинамические соотношения Максвелла, правило Максвелла для фазового перехода жидкость – газ и др.).

Дальнейшее развитие кинетической теории газов и кинетической теории теплоты связано с деятельностью австрийского физика **Людвига Больцмана** (1844 – 1906). Он усовершенствовал доказательство закона распределения скоростей молекул газа, вывел уравнение для идеального газа и первым доказал Н-теорему, согласно которой идеальный газ, находящийся изначально в нестационарном состоянии, самостоятельно со временем переходит в состояние равновесия. Больцман подтвердил статистический характер второго начала термодинамики.

**Джозайя Уиллард Гиббс** (1839 – 1903) в своей работе «Основные принципы статистической механики» разработал метод, применяемый Максвеллом и Больцманом. Он рассмотрел статистическую механику как особый раздел физико-математических наук.

**Йоханнес Дидерик Ван-дер-Ваальс** (1837 – 1923) разработал первую теорию реальных газов. В 1869 г. он открыл силы взаимодействия между молекулами (силы Ван-дер-Ваальса). Ученый исследовал поведение молекул и занимался теориями, описывающими состояния материи. В 1873 г. он разработал модель, единообразно описывающую газообразную и жидкую фазы вещества. На основе этой модели Ван-дер-Ваальс вывел уравнение состояния, показавшее, что при некоторой температуре исчезают различия в физических свойствах жидкости и ее насыщенного пара, находящихся в равновесии. При такой критической температуре плотность жидкости и пара становятся одинаковыми и исчезает видимая граница между ними. Его теория давала один из способов определения размеров молекулы. За это достижение Ван дер Ваальс получил в 1910 г. Нобелевскую премию по физике.

Так был заложен фундамент термодинамического метода, и началась разработка его приложений, прежде всего к теории тепловых машин.

## 4. Применение паровой машины на транспорте

### 4.1. Паровые автомобили

Паровая машина произвела настоящую революцию на транспорте. Первое действующее паровое транспортное средство создал в 1769 г. французский офицер **Жозеф Кюньо** (1725 – 1804). Деревянная повозка имела три колеса, небольшой паровой котел и машину с вертикальным паровым цилиндром. Переднее управляемое колесо было ведущим и снабжалось зубцами. Повозка двигалась без остановки только 15 минут и проходила за это время 1000 м, после чего нужно было останавливаться и заправлять котел. Двигатель повозки Кюньо имел малую мощность из-за низкого давления в цилиндре. После аварии в 1770 году на парижской улице она была признана опасной и сдана в музей.

В 1784 году в американский изобретатель **Оливер Эванс** получил патент на малогабаритную паровую машину высокого давления (10 атм.), которая могла устанавливаться на небольших транспортных средствах.



Рис. 4.1. Паровая повозка Кюньо

В 1801 году Ричард Тревитик со своим двоюродным братом Эндрю Вивианом построил карету с паровым двигателем, которую продемонстрировал на улицах города Кэмборна. «Пыхтящий дьявол» имел огромные задние колеса, которые приводились в движение одноцилиндровой паровой машиной с давлением 9,5 атм. и горизонтально расположенным цилиндром. Автомобиль вмещал восемь пассажиров, но ходил также на небольшие расстояния. Через три дня эксплуатации по недосмотру машина вышла из строя, а также расплавился котел. Восстанавливать автомобиль Тревитик не стал, а

построил аналогичный в Лондоне. Хотя он и привлек большое внимание публики, но оказался очень неудобным по сравнению с обычными каретами и был на некоторое время забыт.

Так случилось, что все последующие проекты Тревитика по разным причинам не были реализованы. Умер он в нищете, хотя его идеи нашли широкое применение. Уже в 1829 году паровые омнибусы стали самым быстрым пассажирским транспортом, развивая на обычных шоссежных дорогах скорость 24 км/ч. Однако в 1865 г. владельцы железных дорог и конных дилижансов добились принятия закона, ограничивающего скорость паровых омнибусов 7 км/ч за городом и 4 км/ч в городах. Кроме того перед экипажем должен был бежать человек с красным флажком и предупреждать всех об опасности. Этим законом развитие парового безрельсового транспорта было остановлено на три десятилетия.



Рис. 4.2. Паровой автомобиль Тревитика

В конце XIX века паровые и электрические автомобили получили широкое распространение. Так в США в 1900 г. примерно половина автомобилей была на паровом ходу. Первое время после появления автомобилей с ДВС паровые автомобили превосходили их по своим характеристикам. Так гоночный паровой автомобиль Stanley Rocket. В 1906 г. установил рекорд скорости – 205,44 км/ч.

Несмотря на ряд достоинств, таких как хорошие тяговые характеристики и многотопливность, паровики в 1910-х гг. стали вытесняться бензиновыми автомобилями. К началу 1920-х годов паровые автомобили производились совсем в небольшом количестве. К 1930-м гг. паровые автомобили из-за своей неэкономичности и

сложностей при эксплуатации практически сошли со сцены. Но все же до 1960-х гг. промышленность выпускала паровые грузовики, которые, в частности, использовались фермерами США и Великобритании.

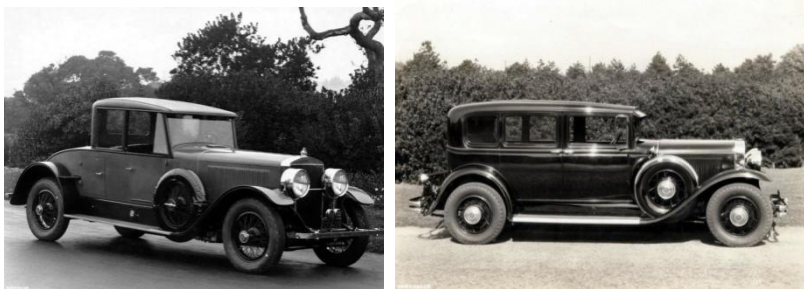


Рис. 4.3. Паровые автомобили братьев Добл. Имели ключ зажигания, более мощный и практичный двигатель, работавший на керосине, были просты в управлении. Машины разогревались всего за полторы минуты, в то время как более старым паровым автомобилям для этого требовалось не менее получаса. Максимальная скорость модели «Е» 1924 года (на рис. слева) составляла 160 км/ч, а до 100 км/ч она разгонялась всего за 10 секунд. Автомобили братьев Добл не нашли применения из-за высокой стоимости.



Рис. 4.4. Паровой грузовик НАМИ-012. Разработан в 1950-е гг. в СССР для районов, где затруднена доставка нефтепродуктов. Развивал скорость 45 км/ч, грузоподъемность 6 т, запас хода до 80 км. Эти грузовики могли работать на дровах, угле или торфе и использовались для вывоза бревен на лесозаготовках.

Производство паровых автомобилей не прошло бесследно. Некоторые важные элементы современных автомобилей внедрены

именно для них. Так в 1834 г. американский инженер Робертс изобрел дифференциал, а в 1843 его соотечественник Хилл – коробку перемены передач. Колеса со спицами, легкие рамы из труб, шарикоподшипники и пневматические шины автомобиль получил от велосипеда.

## 4.2. Создание парового трактора

Наряду с машинами, предназначенными для перевозки грузов и пассажиров, промышленность и сельское хозяйство также остро нуждались в самодвижущихся машинах, выполняющих сельскохозяйственные, дорожно-строительные, землеройные и другие работы. Такие машины (трактора) появились также в XIX веке и также, как и локомотивы, и автомобили, были паровыми. От автомобилей трактора отличались низкой скоростью и большой силой тяги. Поэтому они оснащались ведущими колесами большого диаметра, часто металлическими с грунтозацепами, либо гусеницами.

Первые подобные тракторам машины появились в середине XIX века. В 1850 г. английский изобретатель Уильям Говард использовал для пахоты локомобиль. Вскоре на полях работало уже около двух тысяч таких машин.



Рис. 4.5. Один из первых тракторов

Паровые тракторы использовались также для монтирования на них различных дорожных, таких как бульдозеры, катки и пр., а также погрузочных машин – кранов и экскаваторов. Они также эффективно применялись и в армии для транспортировки тяжелых орудий и

доставки грузов. Так в Русско-турецкой войне 1877 – 1878 гг. использовались все 12 паровых тракторов, имеющихся в составе русской армии. Паровые трактора, также, как и паровые автомобили еще в первой четверти XX века конкурировали с тракторами, оснащенными ДВС.



Рис. 4.6. Паровой трактор Фаулер В5 «Лайон». Модель 1887 г.

Поскольку колесный движитель не всегда обеспечивал проходимость машин в условиях бездорожья, внимание изобретателей было обращено на движитель гусеничный. Первым паровым гусеничным трактором в мире считается машина англичанина Джона Гиткота (1837 г.), предназначавшаяся для вспахивания и осушения английских болот. В 1858 году американец Уоррен Миллер изобрел и построил гусеничный трактор, с которым участвовал в сельскохозяйственной выставке города Мэрисвилл (Калифорния). Однако эти трактора дальнейшего развития не получили. Первым практически полезным гусеничным трактором стал паровой трактор изобретателя Элвина Орландо Ломбарда, созданный в 1901 г.

Ведущий инженер и управляющий английской компании «Ричард Хорнсби и сыновья» Дэвид Робертс изобрел устройство, состоящее из отдельных звеньев, и являющееся прародителем современной стальной гусеницы. Оно получило название Caterpillar track – гусеница. В 1910 г. фирмой «Ричард Хорнсби и сыновья» был разработан гусеничный тягач массой в 40 т, предназначавшийся для доставки угля на электростанцию на Аляске. Паровая машина мощностью 80 л.с. позволяла буксировать восемь прицепов массой по 12,5 т и доставлять за один рейс на электростанцию около 60 т угля. Механизм



управления, использовавшийся на этом тракторе, стал прототипом современного. Этот трактор успешно работал до 1927 года.

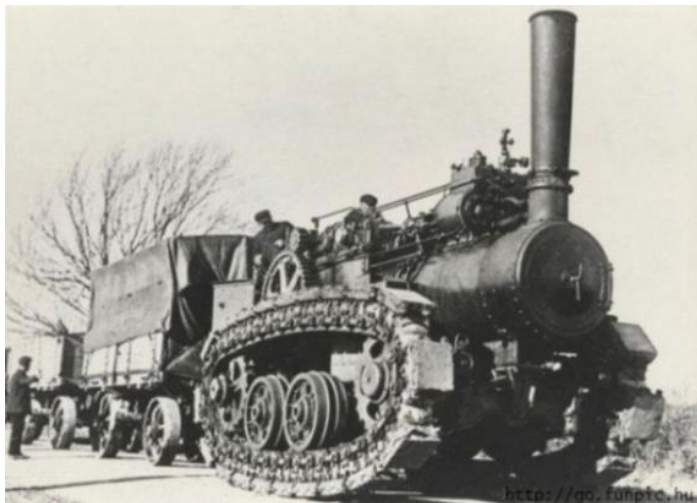


Рис. 4.7. Гусеничный тягач фирмы «Ричард Хорнсби и сыновья»

#### **4.3. Создание первых паровозов**

Среди всех видов техники паровые машины сыграли, пожалуй, самую важную роль в развитии железнодорожного транспорта. Паровоз на долгие годы стал самым ярким символом мощи и скорости.

К моменту появления железных дорог в начале XIX века основные их составляющие – паровая машина и рельсовый путь уже достигли определенного уровня развития. Уже к началу XIX века был создан паровой автомобиль Ричарда Тревитика. По существу для создания первого паровоза все было, оставалось только поставить экипаж на рельсы, что и сделал Тревитик в 1803 году. Он построил свой паровоз «Непоборимый» по заказу металлургического предприятия в Южном Уэльсе для замены конной тяги на рельсовой дороге, по которой возили уголь. Рельсы были уголковые, поэтому колеса диаметром 1372 мм гребней не имели. Масса паровоза была примерно 5 т. Хотя скорость достигала 8 км/ч, путь в 16 км паровоз с составом общей массой 25,4 т преодолел за 4 часа и 5 мин. Это связано с частыми остановками из-за поломок рельсов, чего не было при использовании конной тяги. Вместо того чтобы усилить рельсовый путь хозяин паровоза Гомфри использовал его в качестве

стационарной установки для откачки воды. Все последующие проекты Тревитика по разным причинам не были реализованы. Умер он в нищете, хотя его идеи нашли широкое применение.

В период 1810 – 1813 гг. ряд изобретателей создали более совершенные локомотивы. В 1812 году инженер Муррей создал паровоз «Бленкинсон», передвигавшийся по обычным рельсам. Однако в движение его приводило зубчатое колесо, которое катилось по зубчатой рейке, расположенной рядом с рельсами. Паровоз Муррея возил уголь до 1834 года, проработав 22 года. Позже было доказано, что гладкое колесо, катящееся по гладкому рельсу, в полной мере может обеспечить тягу локомотива. В настоящее время зубчатые железные дороги сохранились только на горных участках с очень большими подъемами.

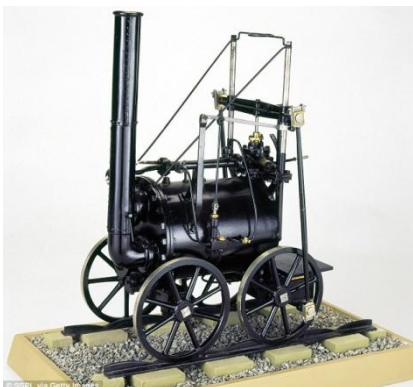


Рис. 4.8. Паровоз Тревитика    Рис. 4.9. Паровоз «Бленкинсон» Муррея

В 1813 году **Блекет** и **Хёдли** построили паровоз «Пыхтящий Билли» с гладкими ведущими колесами, который работал на Вулатской дороге 50 лет. Позднее он стал экспонатом Кенсингтонского музея в Лондоне и является самым старым из сохранившихся паровозов.

Самыми удачными оказались паровозы, спроектированные и построенные Джорджем Стефенсоном. В 1814 году он создал свой первый паровоз «Блюхер», а в последующие годы еще множество машин. Все они работали на промышленных дорогах небольшой протяженности. Однако в результате развития паровозов на повестку дня был поставлен вопрос создания междугородных дорог общего назначения.

Строительство первой в мире железной дороги общего пользования протяженностью 21 км между Стоктоном и Дарлингтоном началось в 1822 году. Для этой дороги Стефенсон построил три паровоза типа «Locomotion» («Самодвижение»), мощностью 7–8 л. с., обеспечивающей скорость 13 км/ч. Именно от него вошло в обиход слово «локомотив». Паровозы «Самодвижение» непрерывно проработали до 1904 года, т.е. более 80 лет. Строились они на первом в мире паровозостроительном заводе в Ньюкасле. 27 сентября 1825 года дорога была открыта. В жизни человечества начиналась новая эпоха.

Однако паровозы на дороге Стоктон – Дарлингтон водили только тихоходные угольные составы. Пассажиров перевозили в специальных вагончиках, запрягая в них лошадей, поскольку паровозы не обеспечивали необходимой скорости. Тем не менее, эксплуатация первой дороги приносила немалую прибыль, и в Англии была заложена дорога Ливерпуль – Манчестер.

Ряд выдающихся инженеров внес вклад в развитие паровозов. Среди них можно отметить Гакворта, который создал трехосный паровоз «Король Георг» в котором предложил целый ряд нововведений, а именно:

- спарники для передачи вращения ведущим колесам;
- осевой выпуск мятого пара через конус в трубе для интенсификации подачи воздуха в топку;
- рессоры на двух передних осях (задняя во избежание качки от сил инерции в вертикально расположенных цилиндрах рессор не имела);
- насос для питания котла водой;
- пружинный предохранительный клапан на котле.

В 1828 году завод Стефенсона построил для США паровоз «Америка». Этот локомотив имел железные бандажы колес вместо чугунных. Вторым важным нововведением стало расположение цилиндров под наклоном 33°, что позволило подвесить на рессорах все оси.

В том же 1828 году Сеген поставил на паровоз Стефенсона, предназначенный для французской железной дороги Лион – Сент-Этьен жаротрубный котел. Его конструкция применялась почти без изменений в течение всей последующей эксплуатации паровозов. Именно жаротрубный котел позволил паровозу Стефенсона «Ракета» победить в 1829 году на знаменитом состязании в Рейнхилле и пройти дистанцию с грузом в 13 т со средней скоростью 19 км/ч при максимальной скорости 48 км/ч. Без груза «Ракета» показала скорость

56 км/ч. Восемь паровозов типа «Ракета» были заказаны для дороги Ливерпуль – Манчестер, открытой 15 сентября 1825 года. Она стала первой в мире дорогой, где и грузовое, и пассажирское движение осуществлялось паровозами. Она также стала эталоном при создании железных дорог в Англии и в других странах по устройству рельсового пути, паровозам, вагонам и различным инженерным сооружениям. До сих пор 75% дорог имеют степенсоновскую ширину колеи – 1435 мм. «Ракета» стала прообразом и первого русского паровоза, который в 1833 г. создали отец и сын **Черепановы** на Урале.

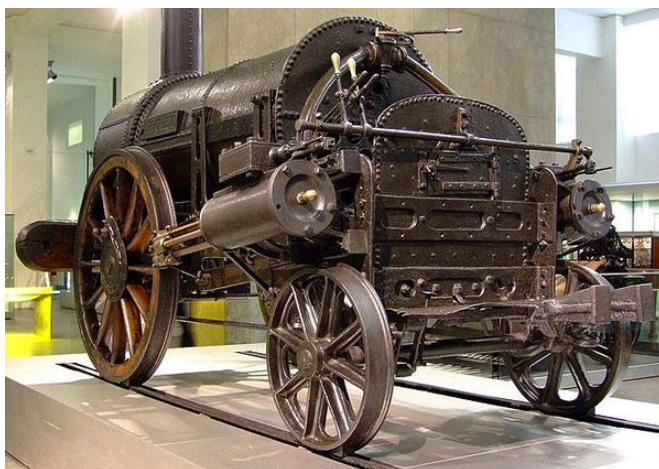


Рис. 4.10. Паровоз Стефенсона «Ракета»

В 1825-е годы в Англии развернулось масштабное строительство железных дорог. Их стали также строить сразу в нескольких государствах Европы и в Америке. Это потребовало резкого увеличения выпуска паровозов и соответственно заводов по их выпуску. Тогда же был заложен классический тип паровоза. Паровые машины, как правило, имели два цилиндра. К паровозу стали цеплять специальный вагон с запасом воды и топлива – тендер. На этом можно считать закончился период формирования паровоза.

В XIX веке паровоз постоянно совершенствовался. Отработанный пар в первых паровозах выпускался в дымовую трубу перпендикулярно стенке, что вызывало завихрение пара и дыма и снижало тягу. В 1827 году англичанин **Гакворт** и француз **Пеллетан**

применили выпуск пара через осевой конус в дымовой трубе. В 1835 году Стефенсон установил на паровозе гудок для подачи сигналов. Позднее сначала на американских паровозах, а затем и на европейских появились осветительные фонари.

Значительные изменения претерпели и колеса, которые поначалу были деревянными с железными бандажами, и только в 1830-е годы стали изготавливаться из чугуна. Стальные бандажи появились только в 1840 году. Рамы паровозов поначалу изготавливались из деревянных балок, которые скреплялись железными листами. В 1830 году **Бурри** соорудил для Питтсбургской дороги в США раму из железных брусков. Такие рамы использовались в Америке до конца эпохи паровозов. В Европе до начала XX века применялись рамы из железных листов. До 1838 года паровозы отапливались дровами либо коксом. Применение каменного угля было запрещено, поскольку он давал слишком много дыма. Но изобретение дымосжигательных топков позволило перейти на каменный уголь.

В 1830-е годы была решена и проблема парораспределения. Поначалу паровозы работали без расширения пара в цилиндрах, поскольку их плоские золотники не имели перекрыш. В 1839 году выдающийся французский ученый Клапейрон ввел перекрыш и угол опережения. Немецкий инженер **Майер** в 1842 году предложил конструкцию двойного золотника, состоящего из основного и расширительного блоков. С помощью внешних парораспределительных органов машинист смог управлять режимом работы золотников, меняя не только силу тяги, но и направление движения паровоза.

Параллельно с развитием конструкции паровоза шло теоретическое и экспериментальное изучение проблем паровозной тяги и энергетики. Первая книга по теории паровоза графа **Памбура**, основанная на изучении эксплуатации локомотивов на дороге Ливерпуль – Манчестер появилась в 1835 году.

В XX веке паровозы были усовершенствованы и отличались от своих предков лучшими скоростными показателями при меньшем расходе топлива и воды. Некоторое время в паровозах стали применяться двухцилиндровые компаунд-машины. Однако их существенным недостатком стала невозможность трогания паровоза при остановке в мертвой точке поршня в цилиндре высокого давления. Для преодоления этого недостатка паровозы с компаунд-машиной оснащались сложными приборами трогания, кратковременно пускавшими свежий

пар одновременно в оба цилиндра. В дальнейшем улучшения экономичности паровозов стали добиваться путем перегрева пара и от компаунд-машин в локомотивостроении отказались

В начале XX века пароперегревателями стали оснащать большинство паровозов. Повышение температуры и степени сухости пара увеличивало КПД паровой машины. Если первые пассажирские паровозы работали с КПД 4 – 5%, то у последних моделей он достигал 9%. Но все равно, это было значительно меньше, чем у тепловозов и электровозов.

В XX столетии паровозы стали по-настоящему скоростными машинами. Уже к началу века некоторые локомотивы могли без нагрузки разгоняться почти до 200 км/ч, хотя эксплуатационные скорости были намного скромнее, что было продиктовано состоянием тогдашних железных дорог, которые не позволяли развивать такие скорости.

Примерно в это время закрепляется и привычная конструкция паровоза, которая будет использоваться весь последующий век до окончания эпохи пара.

#### **4.4. Отечественное паровозостроение**

Первые российские паровозы были построены в Петербурге на Александровском заводе и заводе герцога Лейхтенбергского в 1846 г. по образцу степенсоновского «Атласа» и предназначались для Николаевской железной дороги. Поначалу этих двух заводов хватало, и ввоза паровозов из-за границы почти не было. Эти локомотивы неоднократно переделывались, в том числе менялись котлы, устанавливались будки машинистов. Некоторые из них были снабжены бегунковыми осями и стали первыми в мире паровозами с формулой 1-3-0. В результате паровоз принял привычный для нас вид.

В начале 1860-х гг. с отменой крепостного права в России бурно развивается промышленность и строительство железных дорог. В это время завод герцога Лейхтенбергского был закрыт, а Александровский занимался ремонтом паровозов и строил только два – три локомотива в год. В связи с этим было закуплено за границей около 3700 паровозов разных типов.

6 октября 1866 года «с целью сокращения перевода денег за границу» вышло распоряжение правительства о прекращении импорта паровозов. Было начато производство локомотивов на многих

отечественных заводах общего машиностроения. Поначалу эти заводы выпускали несколько десятков паровозов в год, но к концу XIX века в России было развито регулярное паровозостроение, и действовал целый ряд крупных специализированных заводов. Сформировалась отечественная школа паровозостроения, основателем которой был ученик И. А. Вышнеградского **А. П. Бородин**. Среди специалистов железнодорожного дела можно выделить **В. И. Лопушинского, Н. Л. Щукина, Н. П. Петрова, Е. Е. Нольтейна, Ю. В. Ломоносова и А. О. Чечотта**.

С 1880-х гг. происходит переход в грузовом паровозостроении к четырем, а позднее и пяти ведущим осям. Применяются машины компаунд, дающих экономию топлива по сравнению с простой 15 – 20%. Сцепная масса за 30 лет возросла с 35 до 85 т. В начале XX века в паровозах стали вместо двойного расширения использовать перегрев пара, сперва до 260 – 280°, а позднее и до 350°. Это существенно сократило расход воды и топлива и тем самым повысило экономичность паровозов. Повышение скорости движения товарных поездов потребовало перехода от грузовых паровозов типа 0-4-0 к типу 1-4-0, при этом дополнительная бегунковая ось позволила, в свою очередь, устанавливать более мощный котел.

Развитие в России железных дорог потребовало производства 1000 паровозов в год. Поэтому в Харькове в 1895 году было начато строительство паровозостроительного завода (ХПЗ). Это был первый в Российской империи специализированный завод по производству паровозов, так как Путиловский, Сормовский, Коломенский и другие заводы, также выпускавшие паровозы, строились как заводы общего машиностроения. Первый паровоз вышел с завода 5 декабря 1897 года. В 1900 г. ХПЗ выпустил 185 паровозов – больше всех в России, а к концу 1903 г. из ворот завода вышел тысячный паровоз.

Вторым крупнейшим производителем паровозов на территории Украины стал Луганский паровозостроительный завод (ЛПЗ). Его строительство началось в 1896 году, а первый паровоз вышел с завода в 1900 году. ЛПЗ был рассчитан на производство 20 паровозов в месяц и со временем стал лидером российского паровозостроения, в 1905 году он вышел на проектную мощность и выпустил 21,1% паровозов Российской империи – 245 из 1157 локомотивов.

В 1906 году техническим бюро ХПЗ под руководством выпускника Харьковского технологического института (ХТИ)\* инженера **Александра Сергеевича Раевского** (1872 – 1924) был спроектирован паровоз серии «Щ». Это был последний паровоз в России, созданный по канонам XIX века. Он имел паровую машину системы компаунд и колесную формулу 1-4-0. Всего с 1906 по 1918 год было построено 1910 паровозов этой серии. Однако паровозы серии «Щ» имели целый ряд существенных недостатков и быстро устарели. Им на смену пришли товарные паровозы серии «Э» типа 0-5-0. Рабочий проект и постройка паровоза были осуществлены на ЛПЗ. Конструкторы отказались от громоздкой компаунд машины и поставили машину простого действия с перегревом пара. При одинаковой стоимости паровозы серии «Э» были на 25% мощнее серии «Щ». В 1912 г. ЛПЗ выпустил первые 15 паровозов, заказанные Владикавказской дорогой. Они были приспособлены для нефтяного отопления. Опыт эксплуатации паровозов серии «Э» показал, что они были лучшими грузовыми паровозами дореволюционной России. В 1930-е годы, несмотря на выпуск более мощных и скоростных локомотивов, выпуск паровозов серии «Э» продолжался до 1957 года, т.е. до самого конца паровозостроения. По количеству локомотивов одной серии (около 11 тысяч) и по общей продолжительности выпуска (45 лет) паровоз серии «Э» является абсолютным рекордсменом в истории мирового локомотивостроения.

Из пассажирских паровозов, выпускавшихся в Харькове и Луганске до революции, особого внимания заслуживают паровозы серии «С». Этот паровоз типа 1-3-1 (так называемый американский тип «Прерия») был разработан на Сормовском заводе под руководством Б. С. Малаховского.

---

\* В 1929 г. ХТИ был переименован в политехнический институт, а в 1930 г. разделен на пять отдельных институтов, из которых инженерно-строительный и авиационный и ныне существуют самостоятельно, а три других (механико-машиностроительный, электротехнический и химический) в 1950 г. снова были объединены в Харьковский политехнический институт (ХПИ), теперь Национальный технический университет «ХПИ».





Рис. 4.11. Паровоз серии «Э», установленный в Славянске



Рис. 4.12. Пассажирский паровоз серии «С», Россия. Годы постройки 1910 – 1919. Конструкционная скорость – 115 км/ч, мощность 1200 л. с., диаметр ведущих колес 1830 мм, давление пара в котле 13 атм., паровая машина двухцилиндровая простого действия с наружным парораспределением, число цилиндров – 2, диаметр цилиндров 550 мм, ход поршня 660 мм. Всего построено 628 единиц.

Несмотря на то, что к началу XX века появились новые типы локомотива – тепловоз и электровоз, паровоз оставался основным тяговым средством до середины столетия. Совершенствование паровоза состояло в применении пара более высоких параметров – температуры свыше  $400^{\circ}$  и давления свыше 100 атм. Поскольку паровые котлы при этом требуют более точного регулирования, были созданы котлы, работающие на угле в порошкообразном виде. Это заодно позволило использовать уголь более низкого сорта.

Чтобы не выбрасывать в атмосферу большое количество теплоты, на паровозах стали применять конденсацию отработанного пара. Кроме того паровозы стали оснащать автоматическими устройствами в системе управления.

В 1928 г. в СССР началась индустриализация. Бурно развивающаяся промышленность потребовала резкого увеличения пропускной способности железных дорог. Одним из путей этого было увеличение мощности локомотивов. В годы первой пятилетки Луганский паровозостроительный завод был реконструирован. Именно ему в 1931 г. было поручено строительство нового паровоза типа 1-5-1, разработанного всего за сто рабочих дней в Центральном локомотивопроектном бюро Наркомата тяжелой промышленности. Луганские инженеры и рабочие воплотили проект в жизнь всего за 70 дней. Паровоз «ФД» (Феликс Дзержинский) мог работать на нефти, пылеугольном отоплении, многие оборудовались конденсацией пара. Он имел стокер – механическое устройство подачи угля в топку. Паровоз «ФД» развивал мощность до 3200 л. с. и стал основным типом грузового локомотива в СССР, оказав большое влияние на дальнейшее проектирование паровозов. Всего их построено 3211 единиц.



Рис. 4.13. Грузовой паровоз серии «ФД», установленный в Харькове

В 1932 г. Коломенский машиностроительный завод выпустил пассажирский паровоз типа 1-4-2, которому было присвоено имя Иосифа Сталина (серия «ИС»). Многие его части были унифицированы с «ФД». Мощность паровоза «ИС» составляла 2500 л. с. с перегревом пара и давлением 14 атм. Общая масса в рабочем состоянии 133 т, сцепная – 80,7 т, диаметр ведущих колес 1850 мм, максимальная скорость 100 км/ч. Позднее общая масса увеличилась до 103 т, а скорость до 115 км/ч. В 1936 г. производство паровозов «ИС» было передано на Ворошиловградский завод. В 1937 г. завод построил первый паровоз с обтекателем, который на испытаниях развил скорость 155 км/ч. Всего с 1932 по 1942 гг. было построено 649 паровозов серии «ИС», из них 600 на ЛПЗ.

Паровозы «ФД» и «ИС» луганской постройки представлялись на Всемирной выставке в Париже в 1938 г. и были признаны самыми мощными паровозами в Европе.



Рис. 4.14. Пассажирский паровоз серии «ИС» с обтекаемым кожухом

В 1934 г. под руководством инженера П. М. Шаройко на ХПЗ был создан более простой в изготовлении грузовой паровоз серии «СО» (Серго Орджоникидзе) типа 1-5-0. Он имел простую двухцилиндровую машину мощностью 1200 л. с. с перегревом пара и давлением 14 атм. Общая масса паровоза в рабочем состоянии 96,5 т, сцепная – 87,5 т, диаметр ведущих колес 1320 мм, максимальная скорость 65 км/ч. Позднее общая масса увеличилась до 103 т, а скорость до 75 км/ч.

Паровоз выпускался ведущими паровозостроительными заводами страны – Харьковским, Брянским и Луганским (с 1935 г. Ворошиловградский) и стал заметной вехой в развитии советского паровозостроения.



Рис. 4.15. Паровоз «СО» (Серго Орджоникидзе)

В конце 1930-х гг. на Коломенском и Ворошиловградском заводах велись интенсивные работы по созданию новых быстроходных паровозов с давлением пара свыше 100 атм. Однако эти работы были приостановлены войной. В послевоенные годы были созданы новые паровозы, производство которых продолжалось недолго. Век паровоза заканчивался, в 1956 г. их выпуск в Советском Союзе был прекращен. СССР одним из первых в мире перевел железные дороги на тепловозную и электротягу, а дольше всего паровозы выпускались в Китае. Их здесь строили до середины 1980-х гг.

#### **4.5. Судовые паровые машины**

Большую роль паровые машины сыграли и в развитии судостроения. Уже в XVIII веке большое распространение в Европе получил речной транспорт. Многочисленные каналы связывали судоходные реки и озера в единые транспортные системы. При плавании против течения в качестве тягловой силы применялись лошади или бурлаки. Труд бурлаков широко использовался не только в России, но во многих других странах, в том числе и в Западной Европе. Так, например, в Бельгии, Нидерландах и Франции передвижение речных

судов с помощью живой силы сохранялось до тридцатых годов XX века. В Германии и Австро-Венгрии использование людей для буксировки грузов по рекам прекратилось раньше – во второй половине XIX века. В СССР бурлацкий труд был запрещен только в 1929 году. Также на море и в речном флоте широко применялись гребные суда. В связи с вышесказанным создание судов с паровыми двигателями стало важной проблемой. Первые пароходы были созданы для речного флота, поскольку речные суда меньше по размеру, а мощность машин была поначалу невелика. Кроме того для речных судов машина важнее, так как применение парусов на реке весьма ограничено.

Следует отметить, что пока не была создана универсальная паровая машина Уатта, все попытки построить судно, движимое силой пара либо приводили к неудаче, либо оставались на бумаге. После нескольких неудачных попыток первым коммерческого успеха добился английский изобретатель **Роберт Фултон** (1765 – 1815). Его идея создания парового судна не нашла поддержки ни у себя на родине в Великобритании, ни во Франции у императора Наполеона I. Поэтому первый пароход был создан в США. Судно под названием «North River Steamboat of Clermont» (в литературе его неправильно называют «Клермонт») совершало регулярные рейсы по реке Гудзон между Нью-Йорком и Олбани с 1807 года. В качестве движителя на нем применялись гребные колеса. Вскоре после этого не только в Соединенных Штатах, но и в Англии, и в других странах развернулось строительство пароходов.



Рис. 4.16. Пароход Роберта Фультона

В морском флоте создание пароходов шло медленнее. В 1819 г. американский колесный пароход «Саванна» с машиной мощностью 100 л. с. впервые пересек Атлантический океан. Однако большую

часть пути судно прошло под парусами. И только в 1838 г. английский пароход «Сириус» пересек Атлантику без применения парусов.

Несмотря на успешную эксплуатацию пароходов на реках, в военном флоте паровые машины долгое время не находили широкого применения и считались вспомогательными двигателями. Внедрение парового двигателя на боевых кораблях сдерживалось несовершенством колесного движителя. Громоздкие гребные колеса не позволяли расположить полноценную бортовую батарею, приходилось устанавливать в носовой и кормовой частях корабля небольшое количество орудий крупного калибра. К тому же колеса были уязвимы для огня противника.

Внедрение гребного винта решило эти проблемы. Первый винтовой пароход «Архимед» построен в Англии в 1838 году. В 1841 году в строй вступил французский винтовой пароходофрегат «Гомер», водоизмещением 2700 т, вооруженный 20 орудиями. Ходовые качества винтовых пароходов оказались значительно выше, чем у колесных.

В 1848 г. во Франции был заложен первый в мире парусно-винтовой 90-пушечный линейный корабль «Наполеон», водоизмещением 5047 т. Две паровые машины суммарной мощностью 900 л.с. сообщали ему скорость 13,5 узлов.\* В ряде стран часть парусных линейных кораблей переоборудовали в парусно-винтовые, делая вставку с паровой машиной. Однако в Крымскую войну 1853 – 1856 гг. основная часть флотов не только России и Турции, но даже таких промышленно развитых стран, как Англия и Франция, была парусной. Например, из 16 линейных кораблей союзников, вошедших в Черное море, только пять были винтовыми, сохранявшими при этом полное парусное вооружение. В русском же Черноморском флоте все 14 линейных кораблей были парусными. Именно отсутствие паровых линейных кораблей не позволило Черноморскому флоту дать бой противнику в открытом море, и опыт войны показал, что парусные суда отжили свой век, а будущее за пароходами с винтовыми движителями.

Крымская война оказала огромное влияние на развитие военноморского флота. После нее произошел окончательный переход на паровые двигатели. Все боевые корабли, не имевшие машин, были

---

\* узел – единица скорости, равная одной морской миле (1852 м) в час.

исключены из списков военных флотов. Однако архаичные паруса сохранялись на большинстве боевых кораблей еще лет 30.

Последнее сражение парусного флота при Синопе показало также большую уязвимость деревянных кораблей от огня современных бомбических орудий. Это привело к созданию броненосцев. В 1859 г. во Франции был введен в строй первый броненосный корабль «Ла Глуар» водоизмещением 5 600 т, вооруженный 30 162-мм гладкоствольными орудиями, располагавшимися в забронированной батарее. На самом деле это был не новый корабль, а переделанный по проекту инженера **Дюпон де Лома** деревянный винтовой линейный корабль типа «Наполеон», на котором была срезана одна палуба для компенсации веса брони.

Первым броненосцем, полностью построенным из железа, стал английский «Уорриор» (1860 г.). Применение для конструкции корпуса железа позволило увеличить длину корпуса корабля до 116 м, вследствие чего водоизмещение выросло до 9 360 т. «Уорриор» был вооружен 26 68-фунтовыми (203 мм) гладкоствольными пушками и 10 110-фунтовыми (178 мм) нарезными казнозарядными орудиями Армстронга, располагавшимися в каземате, защищенном 112-мм броней. Отсутствие брони в оконечностях корабля компенсировалось установкой там водонепроницаемых переборок. Однако казнозарядные орудия на тот момент оказались крайне ненадежными, а гладкоствольные бесполезными в бою с бронированными кораблями, и «Уорриор» был перевооружен нарезными, но дульнозарядными орудиями. В настоящее время первый в мире броненосец сохраняется в качестве плавучего музея.

Развитие металлургии позволило сначала широко использовать в кораблестроении железо, а затем перейти к более дешевому, но более прочному материалу – стали. Строительство железных, а затем и стальных судов с паровыми машинами и винтовыми двигателями потребовало применения в кораблестроении проведения расчетов на основе современных достижений науки. В результате из мастерства деревянной архитектуры кораблестроение превратилось в наиболее развитую отрасль промышленности, использующую самые разнообразные специальности. За каких-нибудь два – три десятка лет в военном флоте произошел переход от парусных деревянных кораблей, водоизмещение которых не превышало 5 000 т к стальным гигантам, водоизмещением 15 000 т. Для управления движением и вооружением этих кораблей использовалось множество механизмов.





Рис. 4.17. Броненосец «Уорриор». Современный вид

То же явление наблюдалось и в коммерческом судостроении. Так, уже в 1858 г. в Англии был построен гигантский пароход «Грейт Истерн» водоизмещением 32 700 т и длиной 210,4 м. Пароход предназначался для грузопассажирских перевозок и имел две паровые машины суммарной мощностью 7500 л.с. Одна из машин работала на винт, а вторая приводила в движение гребные колеса. КПД силовой установки составляла 3%, поэтому пароход имел еще и шесть мачт с парусами, площадь которых составляла 3400 м<sup>2</sup>. В результате эксплуатация этого гиганта оказалась экономически невыгодной, и его использовали для прокладки трансатлантического кабеля, а в 1890 г. разобрали на металлолом.

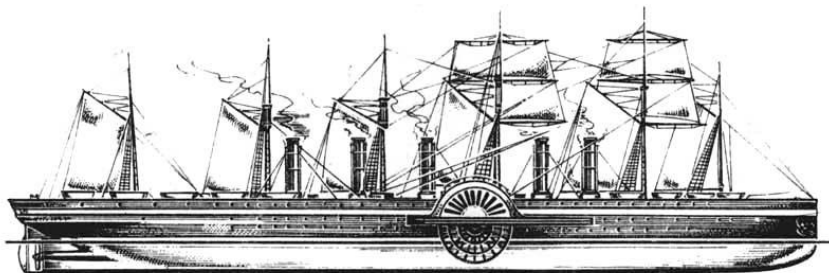


Рис. 4.18. Пароход «Грейт Истерн»



Если первоначально паровая машина служила в качестве вспомогательного двигателя, то со временем на военных кораблях от парусов вовсе отказались, обратив все внимание на совершенствование машин, мощность которых в считанные годы выросла в десятки раз. Именно судовые паровые машины были самыми совершенными. В 1829 г. немецкий инженер Мориц Рентген, работавший в Голландии, предложил машину типа компаунд. Машина имела два рабочих цилиндра разного диаметра. Пар из котла поступал в меньший цилиндр высокого давления, а отработав там, перепускался в больший цилиндр низкого давления. Это позволяло более полно использовать энергию пара и повысить КПД машины.

Однако на первом этапе компаунд-машины не нашли широкого применения, поскольку в судовых машинах тогда применялось очень низкое давление – порядка 1,2 атм., в то время, как в стационарных оно достигало 3 атм. Применение в судовых котлах более высокого давления долго считалось опасным из-за несчастных случаев. С повышением в 1860-х годах давления в паровых котлах до 5 – 7 атм. машины двойного действия получили широкое распространение. В 70-х, 80-х годах XIX столетия мощности машин достигли 5000 л.с., что из-за увеличения размеров вызвало необходимость разделить цилиндр низкого давления на два.

На этом развитие паровых машин не остановилось, при дальнейшем увеличении давления до 10 – 12 атм. был сделан переход к машинам тройного расширения. При этом расход угля сократился почти в полтора раза. Мощность машин возросла до 8 – 9 тыс. л.с., а диаметр цилиндра низкого давления достиг трех метров. Поэтому его часто делили на два. Такая конструкция к тому же оказалась удобной для уравнивания сил инерции по способу, предложенным в 1893 г. немецким инженером **Эрнстом Отто фон Шликом** (1840 – 1913). Машины такого типа мощностью 14 000 л.с. были построены в 1897 г. в Штеттине (сейчас Щецин, Польша) заводом «Вулкан» для парохода «Кайзер Вильгельм дер Гроссе», а затем строились для броненосцев кайзеровского флота.

Самыми большими паровыми машинами стали машины четырехкратного расширения, построенные для роскошного лайнера «Дойчланд». Они имели мощность 17 500 л.с., по шесть цилиндров и давление пара 16 атм. Этот пароход поставил рекорд скорости (23,15 узла) и держал его до введения в строй английских турбинных лайнеров «Мавритания» и «Лузитания». Однако всех надежд лайнер не

оправдал — из-за повышенных вибраций корпуса, наступающих от резонанса при максимальных оборотах машин. Повышенные вибрации беспокоили пассажиров, что привело к падению спроса на билеты и стало причиной финансового краха этого парохода.

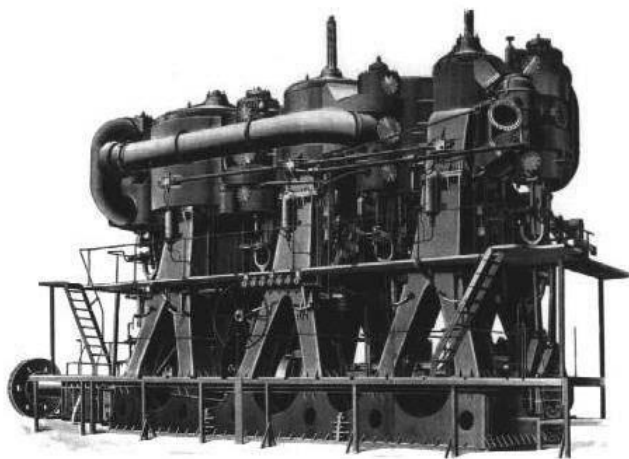


Рис. 4.19. Паровая машина парохода «City of Paris» мощностью 9 000 л.с., Англия, 1888 г.

Дальнейшее развитие машин четырехкратного расширения было прекращено из-за перехода судостроения в начале XX века на применение паровых турбин и дизелей. Но, несмотря на это, строительство морских пароходов продолжалось до 1980-х годов, значительно дольше, чем строительство паровозов, которое прекратилось в конце 1950-х годов. Это объясняется более высоким КПД судовых паровых машин. Дело в том, что пароходы, в отличие от паровозов, могут использовать конденсацию пара для снижения давления на выходе из цилиндров, что существенно повышает КПД. Кроме того, на пароходах могут применяться более эффективные водотрубные котлы по сравнению с жаротрубными, устанавливаемыми на паровозы. Пароходы также могут использовать различное топливо.

Речные пароходы прекратили строить значительно раньше, так как на малых судах дизель намного эффективнее паровой машины.

## 5. Двигатели внутреннего сгорания – основной источник энергии в XX веке

### 5.1. История изобретения ДВС

Громоздкие паровые машины первой половины XIX века с их огромными котлами не могли удовлетворить потребности малых предприятий. Их нельзя было устанавливать вблизи жилых зданий. К тому же КПД паровых машин был очень низок, и существенно повысить его было невозможно. Первые попытки создания ДВС предпринимаются еще до возникновения теоретических основ двигателестроения – науки термодинамики. В 1794 г. англичанин Стрит взял патент на поршневой двигатель, на дно цилиндра которого наливалась горячая жидкость. Она испарялась и смешивалась с воздухом, а полученная горячая смесь воспламенялась и подбрасывала поршень, соединенный рычажной передачей с насосом.

В 1801 г. изобретатель светильного газа француз **Ф. Лебон** патентует поршневой двигатель, работающий на смеси газа и воздуха с зажиганием ее искрой от электростатической машины и сгоранием внутри цилиндра. Увы, Лебон не осуществил своего изобретения – он покончил с собой в 1804 г.

В 1805 г. швейцарец **И. Риваз** предлагает двигатель на водороде. В 1816 г. английский священник Р. Стирлинг получает патент на универсальную тепловую машину, состоящую из цилиндра с двумя по-разному движущимися поршнями и регенератора-теплообменника и способную работать на разных топливах как двигатель внешнего сгорания, как холодильник и как тепловой насос (отопитель). Низкий уровень науки и техники не позволил тогда создать высокоэффективные «стирлинги», однако в наше время у этой машины хорошие перспективы.

В 1824 г. основоположник термодинамики С. Карно предсказывает рабочий цикл четырехтактного двигателя внутреннего сгорания (ДВС), соответствующий четырем ходам поршня: 1-й – всасывание воздуха; 2-й – сжатие его, в конце которого подача и сгорание топлива; 3-й – рабочий ход – расширение газообразных продуктов сгорания; 4-й – выпуск их.

Особенно остро потребность в компактных и экологически более чистых двигателях ощущалась во Франции с ее развитой мелкой промышленностью. Именно французский механик **Жан Этьен Ленуар** (1822 – 1900) в 1860 г. начинает строить и продавать двухтактные ДВС, работающие на светильном газе, с зажиганием от электрической

искры. Ленуар не сразу добился успеха. После того как удалось изготовить все детали и собрать машину, она проработала совсем немного и остановилась, так как из-за нагрева поршень расширился и заклинил в цилиндре. Ленуар сделал для двигателя систему водяного охлаждения. Однако вторая попытка запуска также закончилась неудачей из-за плохого хода поршня. Только после дополнения конструкции системой смазки двигатель начал работать.

Применение в качестве топлива светильного газа было продиктовано потребностями городской промышленности и широким распространением газового освещения. Однако для сельской местности газовые двигатели были неприменимы. Двигатель Ленуара был первым, практически работающим и серийно выпускаемым ДВС. Но по существу он был просто модернизацией парового двигателя, за исключением того, что поршень в цилиндре перемещался не под давлением пара, а под воздействием воспламененной в цилиндре смеси воздуха и светильного газа. Работали двигатели Ленуара плавно и довольно надежно, их запуск не вызывал затруднений ввиду отсутствия сжатия. Однако отсутствие предварительного сжатия воздуха в цилиндре ограничивает и КПД двигателя Ленуара, он составляет 3–6 %, как и у паровых машин того времени. Но, несмотря на высокую стоимость получаемой энергии (в два раза выше, чем у больших паровых машин), они получили широкое распространение.

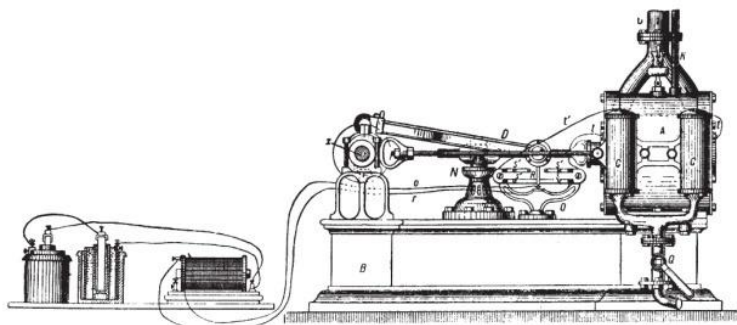


Рис. 5.1. Газовый двигатель Ленуара

В 1877 г. немецкий изобретатель и коммерсант **Николаус Август Отто** (1832 – 1891) создает, наконец, четырехтактный ДВС с искровым зажиганием и КПД 16 – 20 %. Цикл, по которому он работал, назвали циклом Отто. В настоящее время большинство автомобильных двигателей и многие другие ДВС работают по циклу Отто.

В двигателе Отто были осуществлены следующие принципы:

1. сжатие горючей смеси до воспламенения;

2. воспламенение смеси в мертвом положении поршня, чем избегается удар, неизбежный при воспламенении в середине хода поршня, как в двигателе Лемуара;
3. применение четырехтактного цикла;
4. подача смеси таким образом, чтобы в месте зажигания была наиболее богатая смесь.

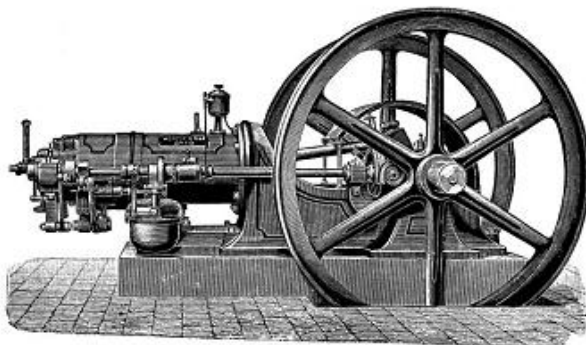


Рис. 5.2. Газовый двигатель Отто

Газовый двигатель Отто оказался очень удобным в эксплуатации и получил широкое распространение. Четырехтактные двигатели начали строить в разных странах. Только завод Отто в Дейтце за первые 20 лет (до 1898 г.) построил около 6000 двигателей. Стремительно росла мощность двигателей. В 1889 г. цилиндровая мощность уже достигла 100 л. с. Завод Отто в Дейтце приступил к выпуску двух- и четырехцилиндровых двигателей мощностью до 1000 л. с.

Существенным ограничением для применения двигателя Отто было использование светильного газа, поскольку светильный газ вырабатывался только в больших городах. Например, в Российской империи он использовался только в Петербурге, Москве и Варшаве.

Инженеры из разных стран искали более доступное и более удобное горючее. В 1873 г. американец Брайтон предложил использовать керосин. Для этого он применил в двигателе испарительный карбюратор. Однако керосин плохо испарялся, и Брайтон перешел на бензин. Конструкция Брайтона была несовершенной, и он оставил попытки создать двигатель на жидком топливе. Двигатель внутреннего сгорания, работающий на бензине, удалось создать только через десять лет.

## 5.2. Создание легких бензиновых ДВС

Первый бензиновый двигатель создали **Готтлиб Даймлер** (1834 – 1900) и **Вильгельм Майбах** (1846 – 1929). Инженер Даймлер, работавший на фирме Отто, еще в начале 1880-х гг. предложил начальнику проект бензинового мотора, который можно было бы использовать на транспорте. После того как Отто отверг его начинания, Даймлер и его друг Вильгельм Майбах уволились из компании Отто и организовали собственное дело. Для своего двигателя в 1883 г. Даймлер сконструировал специальную зажигательную (калильную) трубку открытого типа, для которой не требовался распределительный кран. Перед запуском калильную головку надо было разогреть паяльной лампой, далее ее температура поддерживалась сгоранием топлива при работе двигателя. Такая система сделала возможным строить высокооборотистый двигатель.

Первый карбюраторный бензиновый двигатель Даймлера – Майбаха появился в 1885 г. Их мотор имел рабочий объем  $250 \text{ см}^3$  и развивал мощность 0,5 л. с. при 900 об/мин. Благодаря большому оборотам двигатель получился достаточно компактным и был пригоден для установки на небольшие транспортные средства. Новшеством в нем был закрытый картер, заполненный смазочным маслом, защищавший движущие части от пыли и грязи, что особенно важно для транспортной машины. Для более интенсивного охлаждения быстрого двигателя конструкторы применили пластинчатый радиатор.

Но в целом конструкция мотора оставляла желать лучшего из-за неудовлетворительного зажигания от полой раскаленной трубочки, а также ненадежного процесса испарения бензина.

В 1893 г. появилась более простая и надежная система испарения бензина. Венгерский конструктор Донат Банки изобрел карбюратор, ставший родоначальником современных. Банки предложил не испарять бензин, а равномерно распылять его по цилиндру. Поток воздуха всасывал бензин через дозирующий жиклер, сделанный в форме трубки с отверстиями. Напор потока поддерживался посредством небольшого бачка с поплавком, обеспечивающим постоянную пропорциональную смесь воздуха и бензина. Еще одним новшеством стало зажигание электрической искрой. В 1897 г. **Роберт Бош** (1861 – 1942) по заказу компании «Даймлер» адаптировал магнето (аппарат, вырабатывающий искру для детонации топлива) на двигатель трицикла. В 1901 г. в мастерской Боша в Штутгарте было создано магнето высокого напряжения, которое заменило системы зажигания в виде калильных трубок и открытого пламени. Таким

образом Бош решил проблему зажигания для высокооборотных автомобильных двигателей внутреннего сгорания. 7 января 1902 г. Бош получил патент на свечу зажигания и вскоре изобретение уже широко применялось во всем мире.

С этого момента в истории развитие ДВС пошло по нарастающей. Первые карбюраторные моторы имели всего один цилиндр. Рост мощности достигался за счет увеличения объема цилиндра, однако уже к концу столетия начали появляться двухцилиндровые двигатели, а с началом 20-го века все большее распространение начали получать моторы с четырьмя и даже шестью цилиндрами.

Первые автомобильные моторы К. Бенца и Г. Даймлера делали менее 1000 об/мин. Применявшийся на них газораспределительный механизм состоял из нижнего выпускного клапана и верхнего впускного. Привод выпускного был механическим и состоял из кулачка и толкателя. Впускной клапан открывался автоматически за счет разрежения, возникающего при поршня вниз. Внешнее давление преодолевало сопротивление слабой пружины, державшей клапан в закрытом положении, и начинался такт впуска. С достижением поршнем нижней мертвой точки и началом такта сжатия клапаны закрывались. Такие клапаны не требовали механизма газораспределения, но работали с запозданием.

С повышением частоты вращения до 2000 об/мин такая автоматическая система стала приводить к запаздыванию, в результате которого цилиндр не заполнялся свежим воздухом. Эта проблема была решена путем применения клапанов с управлением от распределительного вала. К 1905 г. выпуск двигателей с автоматическими клапанами практически прекратился.

Постепенно ДВС превосходят паровые двигатели и по компактности, и по экономичности. В 1887 году Даймлер и Майбах начали выпуск лодочных моторов, которые стали главной продукцией фирмы на нескольких лет. 10 августа 1888 года совершил первый полет воздушный шар, приводимый в движение двигателем внутреннего сгорания Даймлера. В 1886 году Даймлер и Майбах построили свой первый автомобиль.

Другим изобретателем автомобиля стал **Карл Бенц** (1844 – 1929). В 1885 г. он закончил работу над трехколесным автомобилем. Четырехтактный бензиновый двигатель, размещенный между задних колес, приводил их во вращение с помощью цепной передачи.



Рис. 5.3. Автомобиль Бенца, 1885 г.



Рис. 5.4. Автомобиль Даймлера и Майбаха, 1886 г.

ДВС также позволил реализовать давнюю мечту человечества – создание летательного аппарата тяжелее воздуха. Поиск конструктивных решений привел к оптимальным схемам. В предвоенный период самыми распространенными авиадвигателями стали V-образные 12-цилиндровые моторы жидкостного охлаждения. Их, в частности, выпускали фирмы BMW, «Даймлер-Бенц», Юнкерс (Германия), и «Испано-Сюиза» (Франция), «Роллс-Ройс» (Англия), а также КБ под



руководством **А. А. Микулина** и **В. Я. Климова** (СССР). Вторым распространенным вариантом стал 9-цилиндровый радиальный (звездообразный) двигатель воздушного охлаждения. Известность приобрели двигатели фирм «Гном Рон» (Франция), «Райт» (США), «Накадзима Аэро» и «Мицубиси» (Япония) и КБ под руководством **А. Д. Швецова** (СССР). К началу Второй мировой войны, когда скорости самолетов существенно возросли предпочтение было отдано V-образным моторам, так как у радиальных велико лобовое сопротивление. В связи с этим были созданы двухрядные «звезды» с 14 и даже с 18 цилиндрами. С переходом авиации на реактивные двигатели именно эти двигатели дольше всего использовались в большой авиации (до 1960-х гг.).

Хотя бензиновые двигатели получили широкое распространение, высокая цена бензина и его взрывоопасность вынудили инженеров заняться созданием двигателей, работающих на керосине. Керосиновые двигатели получили распространение в сельском хозяйстве, на небольших электростанциях, но не нашли применения для получения больших мощностей, в основном из-за дороговизны керосина. В связи с этим получили распространение двигатели, оснащенные газогенераторными установками, работающими на каменном угле. В новых газовых двигателях могли утилизироваться и побочные газовые продукты, в том числе газ доменных и коксовых печей.

### **5.3. Создание двигателя Дизеля**

Самый экономичный, получивший широчайшее распространение двигатель создал немецкий инженер **Рудольф Дизель** (1858 – 1913). Основная идея дизельмотора – постепенное сгорание топлива была высказана еще С. Карно. Для реализации этой идеи Дизель предложил сжимать в цилиндре чистый воздух, а после его нагрева в результате сжатия впрыскивать туда топлива. В 1892 – 1897 гг. он разрабатывает компрессорный с воспламенением от предварительно сильно сжатого в цилиндре воздуха ДВС. Первоначально в качестве топлива предполагалось использовать угольный порошок, так как своей нефти Германия не имела. Однако решить проблему очистки цилиндра от продуктов сгорания ему не удалось, к тому же угольная пыль служила абразивом, и трущиеся поверхности очень быстро изнашивались. Зато новый двигатель прекрасно работал на отходах перегонки нефти, которые стали называть дизельным топливом и даже на сырой нефти.

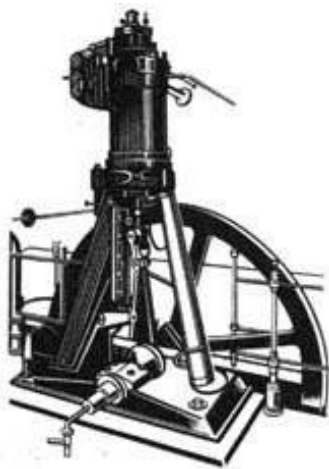


Рис. 5.5. Двигатель Дизеля

Первый двигатель, построенный Дизелем в 1897 году на заводе в Аугсбурге, имел один цилиндр диаметром 250 мм, ход поршня составлял 400 мм. Высота двигателя была 3 м. Двигатель развивал мощность около 20 л.с. при 172 об/мин. Он работал на сырой нефти, расходуя 258 г топлива на 1 л.с. в час. В 1898 году этот мотор был представлен на выставке в Мюнхене. Через год в Мюнхене были представлены уже пять дизельных двигателей, произведенных на Аугсбургском машиностроительном заводе, а также заводах Отто и Круппа. Еще больший успех имел двигатель Дизеля на Парижской выставке 1900 года.

Постройка ДВС в России началась с дизельмоторов почти одновременно с Западной Европой, поскольку они очень хорошо подходили для многочисленных небольших предприятий, составлявших основу экономики страны. Этому также способствовали большие запасы нефти в России, а также высокая пошлина на ввоз дизелей из-за границы. Поначалу строились только лицензионные дизели, и первым право на их производство приобрел в 1899 г. управляющий предприятиями семьи Нобелей в России Э. Нобель, который таким образом хотел увеличить сбыт нефти. В том же году на заводе «Людвиг Нобель»\* в Петербурге был выпущен первый двигатель. Он был одноцилиндровым и имел мощность 20 л.с. при частоте вращения 200 об/мин. Дизель был достаточно громоздкий, диаметр цилиндра составлял 260 мм. В качестве топлива вместо керосина в нем была применена сырая нефть, поскольку при больших запасах нефти и удобствами ее доставки водным путем по Каспийскому морю и Волге в главные промышленные центры страны Россия не имела достаточных мощностей для перегонки нефти. В ходе создания первого отечественного дизеля были переделаны его основные механизмы и применены новые, более качественные материалы.

---

\* В 1919 г. завод был национализирован и получил название «Русский дизель»

Сравнительные испытания первого русского дизеля с его прототипом, построенным в Германии показали, что дизель завода «Людвиг Нобель» расходовал топлива заметно меньше (КПД отечественного мотора составил 34%), чем модель Аугсбургского завода и развил мощность, заметно превышающую проектную. В 1900 г. завод «Людвиг Нобель» изготовил первые семь двигателей. Выпуск дизелей с каждым годом наращался: в 1901 г. было изготовлено 14 штук, в 1902 г. – 20, в 1903 г. – 37 и в 1904 г. – 50. К концу 1910 г. было продано 450 дизелей общей мощностью 50 000 л.с. К началу 1911 г. заводом производились стационарные и судовые двигатели мощностью до 1000 л.с., в том числе и быстроходные.

Успехи дизельмоторов побудили к их производству и другие заводы. Вслед за Нобелем дизели стали производить Коломенский машиностроительный завод, завод Фельзера в Риге, Николаевский судостроительный и Харьковский паровозостроительный заводы. В 1904 г. **Г. В. Тринклер** создает в России менее громоздкий и еще более экономичный бескомпрессорный дизель.

Первоначально дизели, приводившие в движение станки, мельницы и генераторы, устанавливались с ременной передачей, что создавало определенные неудобства, особенно для электростанций, но вскоре стали применять зубчатые передачи. Целый ряд машиностроительных заводов Европы приступил к выпуску дизелей. За период 1912 – 1932 гг. только три ведущих дизельных завода: «Братья Зульцер» (Швейцария), «MAN» (Германия) и «Бурмейстер и Вейн» (Дания) выпустили различных дизелей общей мощностью 9 300 тыс. л.с. Дизель находит широкое применение не только как стационарный двигатель для замены паровых машин, но и в речном и морском флоте, а также на локомотивах. Особенно бурно дизелестроение начало развиваться с 1930-х годов, когда они нашли применение в морском флоте, а также в автомобиле- и тракторостроении.

Успешное применение дизелей в автомобилях и тракторах побудило конструкторов к разработке авиационных дизельмоторов. В этом также особенно преуспела Германия, где еще в период Первой мировой войны фирмой «Юнкерс» был спроектирован авиационный дизель. В 1933 г. создали ЮМО-205 (700 л.с.), позднее – ЮМО-207 (1 000 л.с. с турбонаддувом). 700-сильные авиадизели были также и у фирмы «Даймлер – Бенц». Усиленно вели разработку BMW и Сименс. На втором месте были США, где к началу 1930-х гг. дизели уже ставили на самолеты. Наибольших успехов добились фирмы Паккард, Авиэйшн и Гиберсон.

#### 5.4. Первые дизельные локомотивы

В течение почти 100 лет паровоз был единственным типом локомотива и стал символом прогресса и технической мощи. Однако, наряду с многими достоинствами, к которым относятся простота конструкции, многотопливность, хорошие тяговые характеристики на малой скорости и при трогании с места, паровоз имеет и целый ряд недостатков. К ним, в первую очередь относятся низкий КПД, вредные выхлопы и трудность управления. Профессия машиниста паровоза требовала не только значительных физических усилий, но и высокой квалификации. Выходом из создавшегося положения был переход к локомотивам с ДВС или электродвигателями.

Первый локомотив с ДВС был построен Готтлибом Даймлером. Это была двухосная узкоколейная моториса, впервые продемонстрированная 27 сентября 1887 г. на фольклорном фестивале в Штутгарте. На ней был установлен двухцилиндровый газовый двигатель внутреннего сгорания мощностью 10 л.с.

Несмотря на все очевидные преимущества тепловозов перед паровозами, первый экспериментальный тепловоз «Термо» для работы на магистральных линиях был разработан под руководством Рудольфа Дизеля Адольфом Клозе только в 1909 г. 100-тонный локомотив был построен на заводе Борзиг концерна Зульцер к сентябрю 1912 г. На этом тепловозе были установлены два дизеля – основной мощностью 750 л.с. и вспомогательный – мощностью 250 л.с. Последний использовался для подачи сжатого воздуха в цилиндры в момент трогания с места, при маневрах и для турбонаддува на режиме повышенной мощности. Однако из-за возникших проблем с механической передачей, смертью Р. Дизеля, а также начавшейся в 1914 г. Первой мировой войны работы над тепловозом были прекращены.

Бóльших успехов достигла американская компания General Electric, которая в июле 1913 г. выпустила тепловоз, работавший на бензине. Через несколько лет она свернула его производство, перейдя на более дешевое дизельное топливо. Специально для тепловозов в компании был разработан и построен свой дизель. Первые опытные образцы дизельных локомотивов выпускались General Electric в 1917 – 1918 гг. Однако мощность этих локомотивов была невелика, что не позволяло использовать их в качестве магистральных. Вскоре General Electric прекратила работу над тепловозами.

Однако в дальнейшем двигатель Дизеля нашел широкое применение в локомотивостроении. Развитию тепловоза очень способствовал закон штата Нью-Йорк, запрещавший с 1908 г. использование паровозов на территории острова Манхэттен, а затем с 1931 г. и на территории всего города и его пригородов. Первые американские тепловозы предназначались для маневровых работ. Первый пассажирский магистральный тепловоз появился только в 1928 г.

Со временем тепловоз стал экономически выгодной заменой малоэффективным устаревшим паровозам. Дизельные локомотивы имеют КПД 26–29 % против 8 % у паровозов, и стоимость часа работы тепловоза уже в 1930-е гг. была в два с лишним раза меньше, чем у паровоза. Его широкому распространению не мешало и внедрение электрической тяги, так как она рентабельна лишь на магистралях с достаточно интенсивным движением.

В СССР первые тепловозы были построены в 1924 г. – 6 ноября дизельные локомотивы Щ<sup>эл</sup>1\* системы инженера **Я. М. Гаккеля** и Э<sup>эл</sup>2 – профессора **Ю. В. Ломоносова** совершили первую поездку. Оба тепловоза имели электрическую передачу.

По результатам эксплуатации первых тепловозов было решено приступить к серийному выпуску дизельных локомотивов. В качестве прототипа был принят тепловоз Э<sup>эл</sup>, имевший электрическую передачу постоянного тока и мощность 1150 л.с. Первые серийные тепловозы, являвшиеся его развитием, – маневровый серии «О» и магистральный двухсекционный тепловоз серии ВМ, начал выпускать в 1931 г. Коломенский завод. Всего было изготовлено 46 локомотивов, включая опытные образцы. Однако по личному распоряжению наркома путей сообщения Л. М. Кагановича в 1937 г. прием тепловозов в эксплуатацию был прекращен, 18 машин, выпущенных в 1937–1941 годах, были оборудованы для применения в качестве передвижных дизель-электростанций. Накануне Великой Отечественной войны работы над тепловозами были прекращены. Принятые тепловозы эксплуатировались на Ашхабадской железной дороге, где испытывался недостаток воды, пригодной для паровозных котлов. Эти локомотивы были выведены из парка в середине 1960-х годов ввиду морального устаревания.

---

\* Первые советские тепловозы обозначались буквой серии паровоза схожей мощности, а верхний индекс указывал на тип передачи.

В послевоенные годы в СССР остро встал вопрос о реконструкции железных дорог и переводе их на электровозную и тепловозную тягу. Восстанавливаемое после войны народное хозяйство нуждалось в большом количестве новых локомотивов. На конец 1946 года тепловозный парк СССР составлял 132 единицы, так как он пополнился в годы Великой Отечественной войны поставлявшимися по ленд-лизу в Советский Союз из США локомотивами. Всего было получено 70 тепловозов Д<sup>А</sup> компании ALCO (American Locomotive Company) и 30 Д<sup>В</sup> – компании Baldwin.

С целью скорейшего пуска тепловоза в производство было решено взять в качестве прототипа грузовой маневровый локомотив Д<sup>А</sup>. Когда решался вопрос, какому заводу поручить их выпуск – Коломенскому или Харьковскому, выбор был сделан в пользу ХЗТМ № 75 (бывший ХПЗ). Были учтены не только возможности выпуска на заводе локомотивов и дизелей, но также и то, что в Харькове на электромеханическом заводе выпускались тяговые электрогенераторы и электроаппаратура. Учитывалось также, что в ХММИ имеются кафедры ДВС и локомотивостроения, возглавляемые видными учеными В. Т. Цветковым и С. М. Куценко.

Первоначально завод № 75 не справлялся с заданиями. Сказывалась послевоенная разруха и подводили смежники. Однако трудности удалось преодолеть, и в 1947 г. на ХЗТМ стали выпускать тепловоз ТЭ1. Дизель для него, получивший наименование Д50, был четырехтактный, шестицилиндровый, развивал мощность 1 000 л. с. при 740 об/мин. На базе этого двигателя был создан судовой дизель Д50С мощностью 900 л. с. при 720 об/мин. Вскоре мощность тепловозного дизеля была повышена – новая модификация 2Д50 развивала до 1 150 л. с. при 740 об/мин и в 1950 г. был начат выпуск тепловоза ТЭ2 вместо ТЭ1, снятого с производства. План выпуска тепловозов в начале 1950-х гг. составлял 6–8 штук в месяц. Однако мощность этих локомотивов не удовлетворяла требованиям железных дорог, поэтому еще в 1948 г., по инициативе директора ХЗТМ Ю. Е. Максарева, было принято решение об организации на заводе производства новых тепловозных дизелей мощностью 2 000 л. с. Прототипом для них был выбран 10-цилиндровый двухтактный судовой дизель фирмы «Фербенкс Морзе» (США). Такими дизелями оснащались ледоколы, получаемые Советским Союзом по ленд-лизу и приписанные к Мурманскому порту. После окончания войны эти ледоколы были переведены в Ленинградский морской порт для

подготовки к отправке в США. Пока в 1949 г. велись переговоры между СССР и США, один дизель был снят с ледокола, разобран и с него были тщательно сделаны эскизы и подготовлены чертежи. Опытный дизель 2Д100 был изготовлен в 1952 г. Это был двухтактный двухвальный дизель со встречно движущимися поршнями. Он имел стальной сварной блок цилиндров «этажерочного» типа, в котором цилиндры были расположены вертикально, и чугунные коленчатые валы длиной около четырех метров и массой 1 490 кг у верхнего вала и 1 740 – у нижнего.

В 1953–54 гг. был изготовлен первый двухсекционный тепловоз ТЭЗ, оснащенный дизелями 2Д100. Этот локомотив имел мощность 4 000 л.с. и конструктивную скорость 100 км/час. Он стал основным тепловозом СССР на ближайшие годы и обеспечил перевод советского железнодорожного транспорта на тепловозную тягу. Всего было выпущено 13 594 секций этого локомотива. Для сравнения, тепловозов ТЭ1 и ТЭ2 было выпущено 300 и 1 056 секций соответственно. В 1956 г. на базе ТЭЗ был разработан пассажирский тепловоз ТЭ7 со скоростью 140 км/час.

Поскольку ХЗТМ интенсивно занимался новой техникой, в 1956 г. производство тепловоза ТЭ2 и семейства дизелей Д50 было передано на другие заводы, а выпуск паровозов в СССР в том же году прекращен. В 1958 г. по технической документации, предоставленной заводом им. Малышева, начал выпуск дизеля 2Д100 Коломенский завод.

В 1956 г. отдел 60Д приступил к разработке на базе 2Д100 дизеля мощностью 3 000 л.с. В 1958 г. была изготовлена промежуточная модель – 12-цилиндровый дизель 9Д100 с мощностью 250 л.с. на секцию, и в том же году на опытном стенде был отработан рабочий процесс при цилиндровой мощности 300 л.с. Это стало возможным благодаря внедрению двухступенчатой комбинированной системы турбонаддува. В 1959 г. были созданы первые опытные десятицилиндровый дизель 10Д100 и секция тепловоза ТЭ10. Всего выпущено 17 000 секций тепловозов серии ТЭ10 всех модификаций и выпуск продолжается до сих пор.

В 1955 г. на кафедре ДВС ХПИ под руководством профессора Н. М. Глаголева начали разрабатывать новый четырехтактный V-образный 16-цилиндровый дизель-генератор Д70. Диаметр цилиндра 240 мм, ход поршня 270 мм. В 1956 г. организована научно-исследовательская лаборатория тепловозных и судовых двигателей.

Первый опытный дизель был собран в 1962 г., а в 1967 г. он прошел государственные межведомственные испытания. Двигатель устанавливали на тепловозы 2ТЭ40 и ТЭ109.

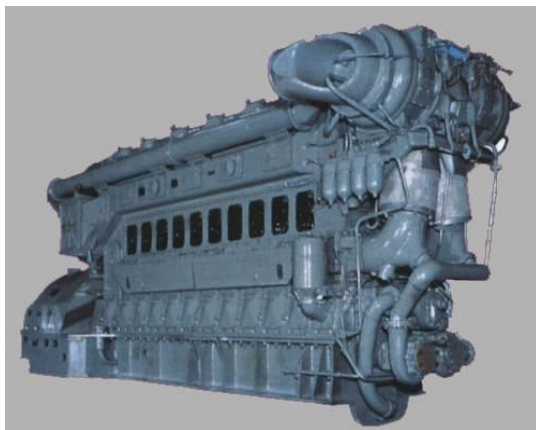


Рис. 5.6. Дизель 10Д100

### *Николай Матвеевич Глаголев*

(1903 – 1976)



Известный ученый в области теории и конструирования двигателей внутреннего сгорания. Доктор технических наук (1948), профессор. Окончил ХТИ в 1926 г. по специальности «Теплотехника». С 1929 г. начал преподавать в ХТИ. В 1954 – 1972 гг. заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания» ХПИ. Внес большой вклад в развитие теории рабочего процесса и разработку конструкций отечественных ДВС.

Тепловозные силовые установки различаются по типу передачи энергии от дизеля к колесным парам: электрические, гидравлические и механические. Наиболее распространенными являются электрические передачи, в которых двигатель вращает ротор генератора, вырабатывающего электроэнергию. Колесные пары приводятся во вращение тяговыми электродвигателями (ТЭД). В тепловозах с



гидравлическими и механическими передачами основная мощность двигателя отдается непосредственно колесным парам.

Электрическая передача является наиболее эффективной. Тепловозы с такой передачей имеют лучшую тяговую характеристику, электропередача также позволяет соединять несколько секций тепловоза и управлять ими из одной кабины. Кроме того, возможно использование электродинамического торможения, при котором ТЭД используются в качестве генераторов, а вырабатываемая ими электроэнергия гасится в тормозных резисторах. По сравнению с пневматическими тормозами электродинамическое торможение более эффективно, меньше износ тормозных колодок, снижается опасность юза колесных пар. Недостатками электропередачи является большая масса и относительная дороговизна оборудования.

### **5.5. Применение дизелей в судостроении**

Идею о возможности использования дизелей на судах впервые высказал инженер К. П. Боклевский в 1898 г. Он же в 1903 г. предложил один из первых проектов дизельного судна и дальновидно утверждал, что «с таким двигателем каждое судно могло бы пойти из любого порта нашей страны во Владивосток, не заходя в иностранные гавани за топливом». Идея оказалась плодотворной. Подавляющее большинство судов мирового флота в настоящее время оборудовано именно дизелями.

Впервые дизели были установлены на небольших речных и озерных судах во Франции и Швейцарии. А первым крупным дизельным судном стала трехвинтовая нефтеналивная баржа «Вандал», построенная в России в 1903 г. Корпус судна был собран на Сормовском заводе в 1902 г. в Нижнем Новгороде, после чего его отбуксировали в Санкт-Петербург, где на следующий год установили три четырехтактных дизеля мощностью по 120 л. с. изготовленных на заводе Л. Нобеля. Двигатели имели по три цилиндра диаметром 290 мм. Длина первого отечественного теплохода составляла 74,5 м, он принимал 750 т груза, а скорость его хода не превышала 7,4 узла.

Следующий теплоход – нефтеналивная баржа «Сармат», введенный в строй в 1904 г., имел два четырехцилиндровых дизеля мощностью 180 л. с. при 240 об/мин.

Эти танкеры предназначались для перевозки нефти из Рыбинска в Санкт-Петербург. Прочный корпус позволял этим судам ходить по Онежскому и Ладожскому озерам, а размеры корпуса были учитывали ограничения Мариинской системы.

Эксплуатация первых теплоходов показала, что их энергетические установки являются значительно более экономичными, чем у пароходов. Так, «Сармат» в течение суток расходовал 1,15 т топлива, а пароход аналогичной грузоподъемности и мощности сжигал 6,5 т. При этом штат машинной и котельной команды был значительно меньше – всего шесть человек. Положительный опыт эксплуатации первых теплоходов пробудил массовое строительство теплоходов. К 1914 г. в России работало уже около двухсот теплоходов, и она опередила в этом деле все другие страны.

В 1908 г. был построен и первый морской танкер «Дело» для акватории Каспийского моря. Он имел дедвейт 4200 т при длине 108,4 м и был оборудован двумя главными четырехтактными четырехцилиндровыми нереверсивными дизелями постройки Коломенского завода мощностью по 460 л. с.

Первым дизельным судном, предназначенным для дальних морских плаваний, стало судно «Зеландия» построенное в 1912 г. в Дании. Его силовая установка состояла из двух дизелей мощностью 200 л. с., которые работали непосредственно на гребной винт.

В России первое дизельное судно, предназначенное для дальних морских плаваний, было построено в 1916 г. в Николаеве. Танкер «Степан Лианозов» с полным водоизмещением 12 200 т предназначался для Черного моря. Он имел длину 122 м, был снабжен двумя двухтактными шестицилиндровыми дизелями мощностью по 850 кВт при частоте вращения 140 об/мин. Двигатели также были изготовлены в Николаеве по лицензии германской фирмы «Крупп».

Существенным недостатком первых дизелей, затруднявшим их использование на водном транспорте, была невозможность реверса (изменения направления вращения). Но уже в 1900 г. французской фирмой «Дикофф» был построен первый реверсивный дизель малой мощности. В 1903 г. реверсивный дизель был использован на речной самоходной барже «Пти Пьер» грузоподъемностью 265 т. В 1906 г. более мощный двухтактный реверсивный дизель швейцарской фирмы «Зульцер» был установлен на озерное сухогрузное судно. Он имел четыре цилиндра и развивал мощность 100 л. с. при частоте вращения 375 об/мин.

В России также велись работы по созданию реверсивного дизеля в течение 1904 – 1908 гг. на заводе «Людвиг Нобель». В 1907 г. завод приступил к постройке четырехтактных трехцилиндровых быстроходных дизелей типа «Д» мощностью по 120 л. с. при частоте вращения 400 об/мин. Машины, проект которых разработал инженер К. В. Хагелин, были установлены на подводной лодке Балтийского

флота «Минога». Всего за 1903 – 1911 гг. завод «Людвиг Нобель» построил дизели для 43 различных судов.

Широкое применение нашли дизели и в военном флоте. Поначалу они использовались на небольших речных кораблях. И здесь Россия на много лет опередила не только Европу, но и Америку. В 1906 году морское министерство приняло решение о постройке восьми канонерских лодок с дизельными силовыми установками. Четыре дизеля суммарной мощностью 1000 л. с. приводили в действие четыре гребных винта. Корабли, спроектированных инженерами Н. Н. Кутейниковым и П. Е. Беляевым предназначались для Амурской военной флотилии и стали первыми в мире дизельными речными боевыми кораблями.

Канонерские лодки «Шквал», «Ураган», «Гроза», «Вихрь», «Шторм», «Тайфун», «Смерч» и «Вьюга» строились на Балтийском заводе в Петербурге и по частям перевозились железной дорогой на Дальний Восток. Н. Н. Кутейников, создал в Осиповском затоне неподалеку от Хабаровска судосборочную базу, где собирались канонерские лодки. Они вступили в строй в 1910 г., а впоследствии были переклассифицированы в речные мониторы.

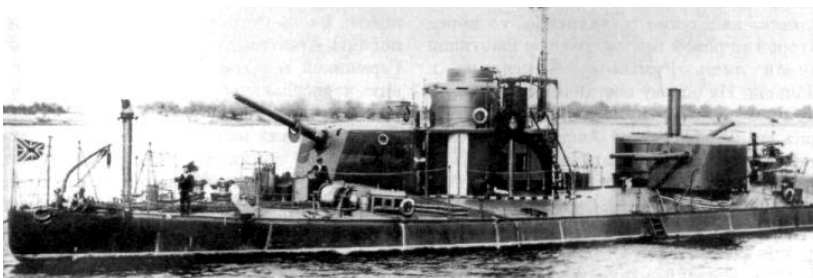


Рис. 5.7. Канонерская лодка (речной монитор) «Шквал», Россия, 1910 г. Водоизмещение 946 т, мощность четырех дизелей 1000 л. с., скорость хода 11 узлов. Длина наибольшая 70,9 м, ширина 12,8, среднее углубление 1,4 м. Бронирование: борт и башни – 114 мм. Вооружение: два 152-мм орудия в одноорудийных башнях, четыре 120-мм орудия в двухорудийных башнях и семь пулеметов. Всего построено 8 единиц.

Самым важным для военно-морского флота стало применение дизелей для подводных лодок (ПЛ). Эти корабли оснащались дизельными двигателями для надводного хода и электромоторами для

движения под водой. Первые дизель-электрические субмарины были созданы в начале XX века, когда были созданы достаточно надежные дизели и довольно быстро вытеснили применявшиеся ранее бензиновые и керосиновые моторы, а также паровые установки.

Двойная схема силовой установки позволила подводным лодкам достичь больших успехов уже в годы Первой мировой войны. Дизельные двигатели обеспечивали высокую автономность плавания, которая уже в 1910-е гг. измерялась тысячами миль, а электромоторы – значительное время хода в подводном положении (не менее 10 часов экономическим ходом). При этом отсутствовала опасность взрыва бензиновых паров или паровых котлов. Все это сделало подводные лодки реальной боевой силой и обусловило их широкое применение. В начале войны для потопления вражеского транспорта подводная лодка всплывала на поверхность и давала возможность экипажу судна спастись, что ставило ее в весьма опасное положение. Но в 1915 г. Германия объявила неограниченную подводную войну, при которой подводные лодки топят торговые суда без соблюдения правил морской войны, установленных Гаагской и Женевской конвенциями. Это нанесло большой ущерб британской морской торговле и едва не поставило империю на колени. В период с 1910 по 1955 годы по дизель-электрической схеме строились практически все субмарины.

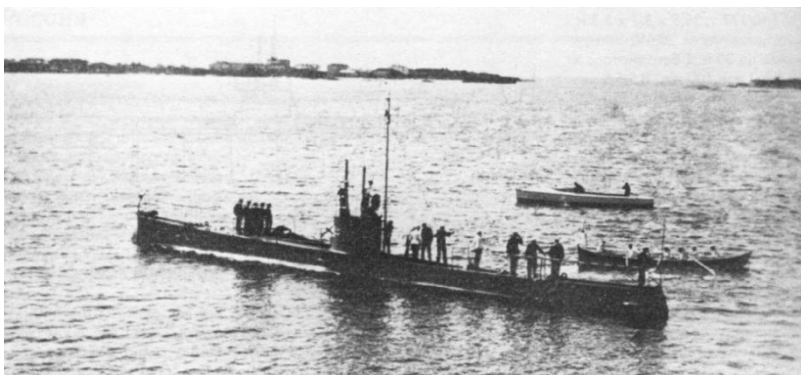


Рис. 5.8. «Миного» – первая в России дизель-электрическая подводная лодка. Построена в 1906 – 1909 гг. по проекту И. Г. Бубнова. Водоизмещение надводное 123 т, подводное – 152 т. Длина 32,6 м, ширина – 2,8 м. силовая установка: два дизеля по 120 л. с. и электромотор 70 л. с. Надводная скорость 10,5 узлов, подводная – 5 узлов.

После окончания Первой мировой войны Германия по условиям Версальского договора лишилась права иметь не только боевую авиацию и танки, но и подводные лодки. Тоннаж надводных кораблей и их количество были также сильно ограничены. Не имея возможности строить мощный флот, немцы сделали ставку в будущей войне с Великобританией на крейсерские операции рейдеров.

Для успешных действий на коммуникациях противника, обладающего огромным флотом, необходимо было создать быстрые крейсера с большой скоростью и дальностью плавания. В связи с этим германские инженеры сделали ставку на дизельные двигатели, не применявшиеся ранее на больших кораблях.

В 1926 – 1930 гг. были построены три легких крейсера типа «К» («Кёнигсберг», «Карлсруэ», «Кёльн»), которые стали первыми в мире боевыми кораблями со смешанными дизель-паротурбинными энергетическими установками. На кораблях было два гребных вала, на каждый из которых могли работать либо турбозубчатые агрегаты, либо дизельные двигатели. Для экономического хода использовались два дизеля фирмы MAN общей мощностью 1800 л. с., которые обеспечивали скорость 10 узлов. Для обеспечения полного хода в 32 узла применялись два ТЗА мощностью 68 000 л. с. Дальность плавания составляла 3100 морских миль. Корабли стандартным водоизмещением (вес полностью укомплектованного корабля с экипажем, но без запасов топлива, смазочных материалов и питьевой воды в цистернах) 6650 т несли 9 150-мм орудий, размещенных в трех башнях, 18 зенитных орудий разных калибров и 4 торпедных аппарата калибра 533 мм. Кроме того они могли брать на борт 120 мин заграждения и имели 2 гидросамолета, запускаемых с катапульты.

Недостаток заключался в том, что силовая установка занимала более половины длины корпуса, что негативно отражалось на боевых характеристиках и живучести корабля. Кроме того турбины не могли работать одновременно с дизелями.

Кроме легких крейсеров Германии разрешалось иметь в строю флота всего шесть кораблей стандартным водоизмещением 10 000 т. По Вашингтонскому соглашению, ограничивающему строительство военно-морских флотов, эти корабли соответствовали тяжелым крейсерам, для которых был установлен максимальный калибр орудий 203 мм. Однако Германия, как страна, проигравшая войну, Вашингтонского соглашения не подписывала, и немцы решили создать в рамках указанного водоизмещения океанские рейдеры с огромной дальностью плавания, вооруженные более мощно, чем крейсера их противников. Главный калибр этих кораблей – 283 мм позволял вести

огонь на дистанцию до 36 475 м. При этом вес снарядов этих орудий превосходил вес снарядов «вашингтонских крейсеров» в 2,7 раза. От более мощных линейных кораблей немецкий рейдер должен был уйти благодаря большей скорости хода [16].

Стремясь максимально облегчить вес рейдеров, немецкие кораблестроители широко использовали в конструкции алюминий, а в качестве главных двигателей впервые для таких больших кораблей использовали дизели. Восемь двигателей фирмы MAN общей мощностью 56 800 л. с., работающие на два гребных винта, обеспечивали максимальную скорость 28 узлов. При этом, в отличие от турбинных кораблей, немецкие рейдеры имели огромную дальность плавания – 16 300 морских миль при ходе 18 узлов.



Рис. 5.9. Тяжелый крейсер «Адмирал граф Шпее». Стандартное водоизмещение 12 100 т, полное – 16 020 т. Длина наибольшая – 186 м, ширина 21,65 м, среднее углубление 1,4 м. Бронирование: пояс – 100 мм, башни – 85 – 140 мм, рубка – 50 – 150 мм. Экипаж – 1070 человек. Вооружение: 2×3 283-мм орудия с длиной ствола 52 калибра, 8 150-мм орудий / 55 кал., 3×2 105-мм / 65 кал., 4×2 37-мм / 83 кал., 10 – 20-мм / 65 кал, 2 четырёхтрубных 533-мм торпедных аппарата, 2 гидросамолета.

В германском флоте новые корабли числились броненосцами, позднее они переклассифицированы в тяжелых крейсера, а в историю корабли вошли под ироническим названием «карманный линкор», придуманным британской прессой в 1930-е гг.

Всего было построено три единицы, водоизмещение которых превышало разрешенный лимит. Так у первого «Дойчланд» стандартное водоизмещение было 10 600 т, у «Адмирала Шеера» – 11 550 т, а у «Адмирала графа Шпее» целых 12 100 т.

Первоначально дизели работали нестабильно и потребовали большого объема доводочных мероприятий, связанных с чрезмерным облегчением двигателей в погоне за экономией веса. Однако со временем их удалось сделать достаточно надежными. Так, «Адмирал Шеер» в своем первом океанском рейде прошел за 161 день, практически не останавливаясь, 46 419 миль без единой поломки двигателей. Однако у дизелей были и свои недостатки. При работе на полную мощность они из-за облегченной конструкции корпуса вызывали сильную его вибрацию, которая мешала артиллеристам вести прицельный огонь. Кроме того уровень шума был такой, что даже в кают-компании невозможно было разговаривать и офицеры, сидевшие рядом, переписывались между собой. Но достоинства дизелей в целом перекрывали их недостатки и делали «карманные линкоры» отличными рейдерами.

В настоящее время большинство грузовых судов и океанских туристских лайнеров оснащаются именно дизелями. При этом КПД огромных тихоходных судовых дизелей свыше 50%.

Самыми крупными круизными теплоходами являются суда типа «Оазис» (см. рис. 5.9), названные так по первому судну «Оазис морей». Их длина составляет 362 м, ширина – 47, а высота – 72 м. Валовая вместимость лайнера – 227 тысяч тонн.

Судно оснащено шестью четырехтактными дизелями производства компании «Вяртсиля» (три 12-цилиндровыми 12V46D объемом 1 156 684 см<sup>3</sup> и мощностью 18 850 л. с. и тремя 16-цилиндровыми 16V46D объемом 1 542 246 см<sup>3</sup> и мощностью 25 133 л. с. при 514 об/мин. На судне применена единая электроэнергетическая система. Судно вмещает 6400 пассажиров, к услугам которых 23 плавательных бассейна, аквапарк для водных шоу, кинотеатр, Королевский театр на 1400 мест, казино, множество магазинов, а также парк, где высажено более 10 тысяч деревьев и кустов, бары, рестораны, включая двухэтажный Wonderland.



Рис. 5.10. Круизный теплоход «Оазис морей», Финляндия, 2009 г.



Рис. 5.11. Самый мощный в мире 14-цилиндровый двухтактный рядный судовой дизель фирмы «Вяртсиля» (Финляндия). Общая мощность 108 920 л. с. при 102 об/мин, объем цилиндров 25 480 л, масса 2300 т, масса коленчатого вала 300 т.



## **6. Развитие турбиностроения. Переворот в энергетике**

### **6.1. Первые шаги турбостроения**

Паровая машина во второй половине XVIII века получила широкое применение и совершила переворот в технике. Она быстро стала главным двигателем и в промышленности, и на транспорте. Однако основоположник термодинамики Сади Карно показал в своей работе «Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу» бесперспективность поршневых паровых машин. Вместо них он предлагает двигатель внутреннего сгорания. Другим двигателем, способным заменить паровые машины стала паровая турбина.

Идея двигателя внешнего сгорания с получением непосредственно вращательного движения появилась намного раньше поршневой паровой машины. Первыми изобретателями таких устройств были Герон Александрийский и Джованни Бранка. Однако для получения практически пригодного двигателя одних идей было мало, и, несмотря на простоту в кинематическом отношении, по сравнению с паровой машиной, паровые турбины, пригодные для практического использования, появились только в конце XIX века. Создание экономически выгодных паровых, а тем более газовых турбин требовало знаний свойств пара или газа и законов их истечения. Как показали более поздние исследования, турбина имеет экономически обоснованный КПД только при достаточно высоких параметрах (температура и давление) пара и высокой угловой скорости вращения ротора. Производство таких турбин требует, в свою очередь, соответствующей технологии, специальных жаропрочных сталей и достаточно точных расчетов на прочность.

Первые масштабные опыты над истечением пара и газа были проведены в 1839 г. Барре де Сен-Венаном и П. Вантцелем и дали числовые данные о высокой скорости пара и газа при истечении из сосуда. В это же время Ж. В. Понселе разработал основы теории водяных турбин. Его исследования показали, что для получения максимального КПД скорость на окружности колеса турбины должна быть не меньше половины скорости потока. Указанные обстоятельства мешали созданию эффективных паровых турбин.

Тем не менее, попытки создать турбинный двигатель предпринимаются во многих промышленно развитых странах. За

первые две трети XIX века было предложено свыше 200 паровых турбин. В основном они имеют небольшие размеры и мощность и применяются там, где требуется большая угловая скорость вращения – на лесопилках для дисковых пил, в молочных сепараторах, центробежных насосах и вентиляторах. Производство этих турбин носило кустарный характер и не имело особого успеха, так как они имели невысокий КПД и применялись там, где в качестве топлива для котлов использовались различные отходы.

Что касается более мощных турбин, то для повышения их КПД была предложена идея многоступенчатых турбин, в которых пар теряет свое давление постепенно, действуя на лопатки, размещенные соответствующим образом, несколько раз. Так в 1853 г. Тёрнер предложил конструкцию многоступенчатой паровой турбины, состоящей из нескольких осей, на которые насажены облопаченные диски. Зубчатые колеса передают вращение от этих осей на общий вал. Вслед за этим целый ряд изобретателей предлагает свои идеи многоступенчатых паровых турбин. Однако эти турбины не нашли применения из-за отсутствия материалов и технологии.

В последней трети XIX века в связи с электрификацией производства и электрическим освещением городов, возникает потребность в экономичном и мощном тепловом двигателе, пригодном для установки на электростанциях. К 1880-м гг. созрели все условия для создания эффективной паровой турбины. Наука теплотехника достигла определенных успехов, достаточно хорошо были изучены свойства водяного пара и законов его истечения. Машинное производство и металлургия были способны удовлетворить потребности турбостроения. Больших высот достигли также сопротивление материалов и теория упругости.

## 6.2. Турбины Лавала и Парсонса

Особый интерес вызывает однодисковая паровая турбина активного типа шведского инженера **Карла Густава Патрика де Лавала** (1845 – 1913), созданная в 1889 г. и предназначенная для молочного сепаратора. Первая его турбина мощностью 5 л.с. со скоростью вращения 30 000 об/мин была продемонстрирована на выставке в Чикаго в 1893 году. Позже изобретатель построил более крупные турбины, самая мощная из которых в 500 л.с. с числом оборотов 9 870 имела средний диаметр колеса 750 мм. Необходимость применения громоздких зубчатых понижающих передач помешала

широкому внедрению турбин де Лавала. Однако, благодаря де Лавалю, был решен целый ряд проблем турбостроения. Среди них:

1. расширяющееся сопло, позволяющее понизить давление пара ниже критического и повысить скорость его истечения до величины выше скорости звука (1200 – 1500 м/с);

2. гибкий вал, позволяющий понизить критические обороты турбины и вывести их за пределы рабочего диапазона. Это позволило применить такие высокие числа оборотов (до 32 000 об/мин), которые намного превышали числа оборотов распространенных в то время двигателей.;

3. диск равного сопротивления, допускаящий его работу с большими окружными скоростями (350 м/с);

4. система закрепления лопаток;

5. шаровые подшипники;

6. «разрушитель вакуума» при слишком больших оборотах турбины;

7. применение специальных материалов – никелевой стали для дисков и лопаток;

8. зубчатая передача с большим передаточным отношением.

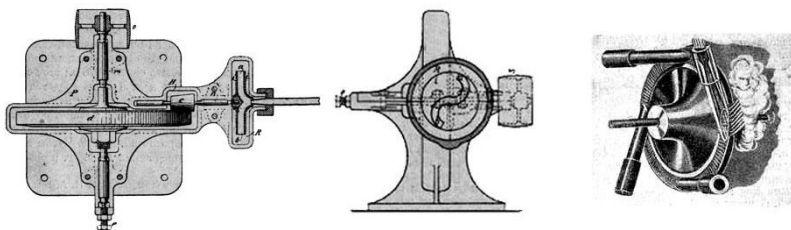


Рис. 6.1. Однодисковая турбина Лавала

Особенностью творчества Лавала является отсутствие у него теоретических основ для изобретений. Именно это обстоятельство не позволило ему добиться больших успехов, к тому же он был человеком увлекающимся и легко переключался с одной темы на другую. С появлением многоступенчатых турбин область применения однодисковых турбин Лавала ограничилась областью машин, требующих большого числа оборотов. Однако она вызвала к себе огромный интерес частностями своей конструкции и облегчила пути дальнейшего развития турбостроения.

В 1884 г. англичанин **Чарльз Алджернон Парсонс** (1854 – 1931) патентует паровую реактивную многоступенчатую турбину. Парсонс с самого начала правильно предугадал одну из наиболее перспективных областей применения паровых турбин – для привода электрических генераторов. В 1885 году он сконструировал турбину, получившую в дальнейшем широкое применение на тепловых электростанциях. Она имела следующее устройство: на центральный вал был насажен ряд вращающихся колес с лопатками. Между этими колесами находились неподвижные диски с лопатками, имевшими обратное направление. Пар под большим давлением подводился к одному из концов турбины. Поскольку давление на другом конце было меньше атмосферного, пар стремился пройти сквозь турбину. Сначала он поступал в промежутки между лопатками первого венца. Эти лопатки направляли его на лопатки первого подвижного колеса. Пар проходил между ними, заставляя колеса вращаться. Дальше он поступал во второй венец. Лопатки второго венца направляли пар между лопатками второго подвижного колеса, которое тоже приходило во вращение. Из второго подвижного колеса пар поступал между лопатками третьего венца и так далее. Всем лопаткам была придана такая форма, что сечение междулопаточных каналов уменьшалось по направлению истечения пара. Лопатки как бы образовывали насаженные на вал сопла, из которых, расширяясь, истекал пар. Здесь использовалась как активная, так и реактивная его сила. Вращаясь, все колеса вращали вал турбины. Снаружи устройство было заключено в крепкий кожух.

В 1889 году уже около трехсот таких турбин использовались для выработки электроэнергии. В 1891 г. паротурбинный двигатель (ПТД) снабжается конденсатором, что делает его более экономичным, чем поршневой, при сохранении превосходства над последним в удельной мощности. Мощность и экономичность паровых турбин стремительно растут и постепенно они в электроэнергетике вытесняют все прочие двигатели. В настоящее время примерно 86 % электроэнергии, производимой в мире, вырабатывается с использованием паровых турбин.

Наряду с аксиальными турбинами, в которых пар движется в направлении оси вала турбины, были созданы радиальные турбины, в которых пар течет в плоскости, перпендикулярной оси турбины. Из них наибольший интерес представляет радиальная турбина, предложенная в 1912 г. в Швеции братьями Юнгстрем.

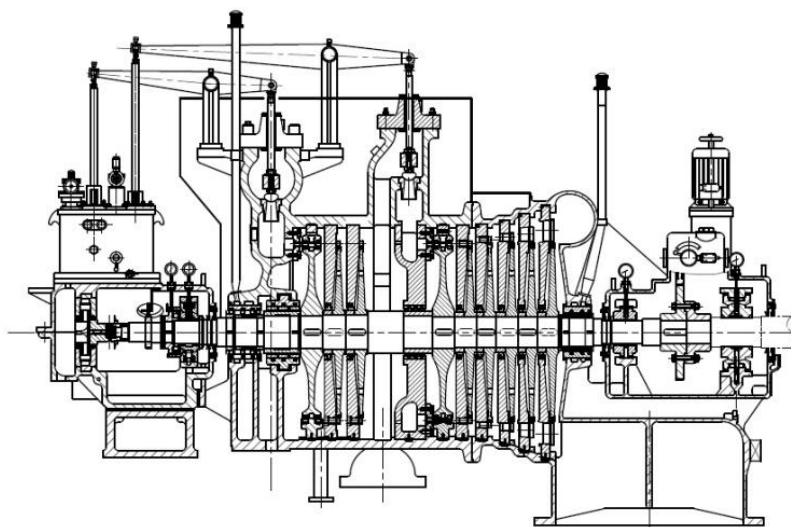


Рис. 6.2. Многоступенчатая реактивная турбина Парсонса

### 6.3. Развитие активных паровых турбин

Развитие активных паровых турбин пошло также по пути последовательного расширения пара в нескольких ступенях, расположенных друг за другом. В этих турбинах ряд дисков, укрепленных на общем валу, разделен перегородками, получившими название диафрагм, в которых расположены неподвижные сопловые решетки. В каждой из ступеней происходит расширение пара. Активные многоступенчатые турбины также нашли широкое распространение в стационарных установках и в качестве судовых двигателей.

Для активных турбин ступени давления впервые были введены в практику французским профессором **Огюстеном Рато** (1863 – 1930), который в 1900 году построил на французском заводе Соттэ-Гарле первую активную многоступенчатую турбину мощностью 1000 л.с. В 1900 г. на Международном конгрессе по прикладной механике в Париже Рато делает доклад, в котором сообщает результаты проведенных опытов по истечению пара и приводит основные формулы для нахождения его скорости. Он исследует и другие вопросы, играющие большую роль в турбостроении, в частности вопрос о трении колеса турбины о пар, а также проблемы прочности частей паровой турбины.

Тип турбины, предложенный Рато, получил большое распространение в Швейцарии, Германии и Франции. Наряду с этим французский ученый создал первый тепловой аккумулятор, позволивший выгодно использовать отработанный пар низкого давления. Важным его достижением стали также турбокомпрессоры, вытеснившие на металлургических заводах прежние поршневые воздуходувки. Рато также одним из первых применил в авиамоторах турбонаддув. Турбина, работавшая от выхлопных газов, соединялась с турбокомпрессором для подачи в цилиндры двигателя воздуха. Это не только повысило мощность двигателя, но и позволило летать на больших высотах, где воздух сильно разрежен.

Инженер швейцарского завода Эшер-Висс в Цюрихе **Генрих Целли** усовершенствовал турбину Рато, применив в 1903 году сопла с косым срезом. За счет этого удалось увеличить скорость пара на выходе из сопла и сократить число ступеней давления до пяти – восьми. Целли также оптимизирует размер рабочих дисков, диаметры которых увеличиваются по мере падения давления пара. В турбинах Рато рабочие диски имели одинаковый диаметр, а число ступеней было 16 – 20.

Другой тип турбин предложил американец **Чарльз Кёртис**. В его турбине пар, проходя через расширяющееся сопло Лавалья, приобретал большую скорость и использовался в нескольких рядах лопаток, расположенных на одном диске. Между подвижными рядами лопаток расположены неподвижные, которые служат для изменения направления движения пара. С 1901 г. турбины Кёртиса строит американская компания «Дженерал Электрик», которая стала одной из ведущих турбостроительных фирм не только в США, но и во всем мире. Наряду с ней крупнейшими производителями турбин стали немецкая Всеобщая компания электричества и швейцарская Броун-Бовери в Европе, а также компания Вестингауза в США.

В результате экономичность паровой турбины и мощность ее в одном агрегате достигли высоких значений. По своей мощности турбины далеко превосходили другие типы двигателей. Параллельно с развитием паровых турбин в 1890-е годы таким же быстрым темпом развивается электроэнергетика. К концу XIX века паровые турбины становятся основным источником для получения механической энергии на электростанциях, постепенно вытесняя все прочие двигатели.

В период до Первой мировой войны паровые турбины строились преимущественно для работы паром умеренного давления (12 – 16 бар), с температурой до 350 °С, поскольку уровень развития металлургии не позволял применять пар более высокого давления и

температуры. К 1915 г. мощность отдельных турбин уже достигала 20 МВт. Тенденция повышения мощности продолжает сохраняться и в послевоенный период. Но, наряду с этим, конструкторы турбин ставят задачу повышения не только мощности агрегата, но и числа оборотов турбин. Турбины, предназначенные для электростанций, выполняются в одном агрегате с генератором электрического тока.

Судовые турбины соединяются с зубчатым редуктором в **единый турбозубчатый агрегат**.

#### **6.4. Развитие отечественного турбостроения**

В Российской империи строительство паровых турбин стало развиваться лишь в начале XX века. При этом строились турбины только по лицензиям западных фирм. На Металлическом заводе в Петербурге – стационарные системы Рато, а судовые для линейных кораблей и линейных крейсеров системы Парсонса Балтийским, Франко-русским и Николаевским судостроительными заводами, а для эскадренных миноносцев и легких крейсеров по типу Всеобщей компании электричества Металлическим заводом, заводом Беккер в Риге и Судостроительным в Ревеле (Таллин).

В годы Гражданской войны производство турбин в СССР полностью прекратилось. В 1920 г. был разработан и план ГОЭЛРО (сокращение от Государственная комиссия по электрификации России), который предусматривал строительство 30 районных электростанций общей мощностью 1500 МВт. Для строительства электростанций, запланированных планом ГОЭЛРО, было необходимо большое количество котлов, турбин и другого энергетического оборудования. По сути надо было создать мощную энергомашиностроительную промышленность.

В 1924 г. в Ленинграде на Металлическом заводе (ЛМЗ) была построена турбина мощностью в 2000 кВт с параметрами пара 12 атм. и 300° С. В 1924 – 1925 гг. ЛМЗ выпустил 10 турбин общей мощностью 12,7 МВт. До 1928 г. завод изготовил еще 40 турбин общей мощностью 66,85 МВт. В этот период максимальная единичная мощность паровых турбин составила 10 000 кВт, а параметры пара повысились до 26 атм. и 375 °С.

Таким образом, к началу первой пятилетки (1928 г.) производство турбин было полностью восстановлено, даже с некоторым преувеличением дореволюционного уровня. В 1931 г. Металлический завод начал производство турбин мощностью 50 000 кВт при 1 500 об/мин. Кроме того, на Кировском (бывший Путиловский) заводе выпускались турбины ограниченной мощности (до 12 000 кВт). В 1930 г. ЛМЗ

приступил к производству паровых турбин мощностью 24 тыс. кВт на параметры пара 26 атм. и 375° С. А в 1931 была построена первая турбина мощностью 50 тыс. кВт на 1500 об/мин., рассчитанная на давление пара 29 атм, при 400° С. С этого момента ЛМЗ перешел на производство турбин большой мощности, что существенно повысило годовую суммарную мощность турбин при значительном уменьшении их количества. Самой мощной (100 МВт) быстроходной турбиной (3000 об/мин) в мире в 1937 г. стала турбина, построенная на ЛМЗ.

Однако для выполнения плана ГОЭЛРО производственных мощностей ЛМЗ не хватало. Потребность в турбинах для такого большого количества новых электростанций привела к острой необходимости создания в СССР еще одного турбинного завода для производства турбин большой мощности (50 – 100 МВт). Турбины ЛМЗ мощностью 25 и 50 МВт уже не могли обеспечить потребности огромной страны, тем более что потребность в электроэнергии резко возросла.

Кроме ленинградских заводов крупное турбостроение было начато в Харькове, который за годы индустриализации стал одним из важнейших центров машиностроения. В городе был построен Харьковский турбогенераторный завод (ХТГЗ) (ныне ОАО «Турбоатом»). Решением СНК СССР от 24 января 1934 г. первая очередь завода была зачислена в строй действующих. Это был величайший в мире завод турбогенераторостроения, он строился по проекту американской фирмы «Дженерал Электрик» и был предназначен для выпуска сверхмощных турбогенераторов в 50, 100 и 200 тысяч киловатт. До начала Великой Отечественной войны завод изготовил и поставил стране турбины, мощность которых вдвое превышала мощность всех электростанций дореволюционной России.

В годы Великой Отечественной войны практически все промышленные предприятия Украины были разрушены. Из всех отраслей промышленности наибольший ущерб был нанесен турбостроению. Для восстановления электростанций срочно нужны были не только запасные части, но и новые турбины, и генераторы. Не дожидаясь окончания войны, правительство УССР принимает меры по восстановлению народного хозяйства, и в первую очередь энергетики.

Несмотря на нехватку квалифицированных рабочих и инженерных кадров, уже в 1944 г. на ХТГЗ началась активная работа по восстановлению технологических циклов производства. Это имело колоссальное значение для восстановления энергетики всей страны. Для города Харькова на ХТГЗ было восстановлено и укомплектовано четыре турбины общей мощностью 68 тыс. кВт; две турбины мощностью 22 тыс. кВт для Киева, а также смонтированы турбины для



Севастополя, Калуги и Штеровской ГРЭС. Выдающимся достижением коллектива завода в 1945 году был выпуск по заданию Государственного Комитета Оборона для Зуевской электростанции турбин мощностью 50 и 100 тыс. кВт. 100-тысячная турбина была изготовлена за короткий срок – 8 месяцев. В середине 1946 года на Зуевской электростанции в Донбассе была сдана в эксплуатацию еще одна изготовленная коллективом завода турбина мощностью 100 тыс. кВт. В мире было лишь несколько таких исполинских турбин. Но самое главное заключалось в том, что эта турбина была изготовлена быстрее менее мощных турбин, выпускавшихся ранее.

С 1948 года турбостроители переходили на производство турбин высокого давления мощностью 50 и 100 тыс. кВт. Новые конструкции машин по своей экономичности и надежности были на уровне современного турбостроения и предопределяли линию технического развития завода на ближайшие 10 – 12 лет. Уже в первом полугодии 1948 г. на ХТГЗ была выпущена турбина высокого давления ВР-25 мощностью 25 тыс. кВт, а в сентябре турбина АК-50 (50 тыс. кВт).

В 1953 году была проведена работа по техническому перевооружению производства паровых турбин, в 1953 – 1954 завод освоил производство гидравлических турбин для гидроэлектростанций, а производство генераторов было передано специализированным заводам.

За сравнительно короткие сроки (1955 – 1958 гг.) были выпущены паровые турбины мощностью до 150 МВт, а в 1960 – 1965 гг. – паровые турбины с повышенными параметрами пара, мощностью 300 и 350 МВт для Приднестровской, Криворожской, Запорожской, Ладыжинской, Троицкой, Рефтинской, Трипольской, Назаровской и других ГРЭС. В 1965 году на заводе была изготовлена первая в СССР одновальная паровая турбина мощностью 500 МВт, на тот момент – самая мощная в мире. В 1969 г. было освоено производство паровых турбин для электростанций мощностью 220 МВт, которые и сейчас успешно эксплуатируются не только на Украине и в России, но и в Германии, Болгарии, Венгрии, Финляндии.

В 1954 г. в СССР была построена первая в мире атомная электростанция (АЭС). Обнинская АЭС мощностью 5 МВт стала первой в мире атомной электростанцией, подключенной к общей электрической сети, хотя и производила электричество не в промышленных масштабах. Началось развитие атомной энергетики. Для АЭС потребовались более мощные паровые турбины. В 1967 г. Харьковский турбинный завод начинает строить турбины для АЭС, а со временем становится головным предприятием по проектированию и

изготовлению таких турбин. В начале 1970-х гг. было налажено производство агрегатов мощностью 500 МВт, что обеспечило резкое снижение капитальных затрат на сооружение электростанций. Турбинами такого типа укомплектована Ленинградская, а также Курская и Смоленская АЭС. В 1977 году завод был преобразован в производственное объединение атомного турбостроения, а в 1982 г. получил название ПО «Турбоатом». К 1978 г. выпущенные заводом турбины были установлены на более чем 100 электростанций СССР, а также на электростанциях во многих других странах мира.



Рис. 6.3. Сборка турбины мощностью 1 млн кВт

5 марта 1982 в эксплуатацию был введен крупный производственный комплекс, позволивший перейти от индивидуального производства паровых турбин АЭС мощностью 1 млн кВт к серийному. К 1985 г. такие турбины были выполнены для Запорожской, Балаковской и Ростовской АЭС.

ПО «Турбоатом» является также крупнейшим производителем гидротурбин. К 1986 г. свыше 40% мощностей ГЭС СССР было укомплектовано турбинами харьковского производства; кроме того, они устанавливались на многих зарубежных электростанциях.

### **6.5. Создание газовых турбин**

На рубеже XX века появляются теоретические исследования о возможности построения турбин, в которых сгорание газовой смеси

происходит внутри, как у ДВС. При этом воздух и горючее предварительно сжимаются до определенного давления, затем сжигаются в специальной камере, а продукты сгорания подводятся к турбине, в которой происходит их расширение для получения механической энергии. Таким образом, газовая турбина представляет собой новый и наиболее совершенный тип теплового двигателя, обладающего всеми преимуществами своих предшественников и свободного от их недостатков. От паровой турбины в ней заимствована идея преобразования потенциальной энергии газа в равномерное вращательное движение рабочего колеса без промежуточных механизмов. От двигателя внутреннего сгорания заимствована идея непосредственного преобразования топлива в рабочее тело путем сжигания его в камере сгорания. Отсутствие котла и всей паровой аппаратуры выгодно отличает газовую турбину от паровой, а отсутствие поршня и кривошипно-шатунного механизма является существенным преимуществом по сравнению с двигателем внутреннего сгорания.

Первый газотурбинный двигатель (ГТД) с процессом горения при постоянном давлении спроектировал и построил инженер-механик русского флота П. Д. Кузьминский в 1897 г. В 1906 г. В. В. Караводин разработал, а в 1908 г. построил и испытал более экономичный ГТД – с пульсирующим процессом (горением при постоянном объеме). Однако мощность опытной турбины Караводина составляла всего 2 л.с. Гораздо более мощной (83 л.с.) была турбина Арманго, изготовленная в то же время. Однако ее КПД составлял всего 3%.

В 1908 г. к созданию газовой турбины приступил немецкий конструктор Ганс Гольцварт. Он избрал тип турбины, работающей отдельными взрывами с небольшим предварительным сжатием, причем давление взрыва дошло до 9 атмосфер. В новой опытной турбине Гольцварта были введены некоторые конструктивные усовершенствования, а первоначальное сжатие было повышено, вследствие чего и давление взрыва повысилось до 12 – 14 атмосфер. Однако КПД этой турбины не превосходил 13% как и у хороших паровых машин. Дальнейшие опыты с газовой турбиной Гольцварта были прекращены из-за больших затрат денежных средств и технических трудностей, которые не удалось преодолеть.

Коэффициент полезного действия газовой турбины зависит от температуры газа перед соплами: чем выше температура, тем выше коэффициент. Однако по условиям жаропрочности применяемых сплавов современные турбины не допускают высоких температур газа, что приводит к сравнительно невысоким коэффициентам полезного

действия. По этим причинам развитие стационарных и транспортных газовых турбин задерживается. Создание эффективных газовых турбин стало возможным лишь после того, как металлургия освоила производство сплавов, способных длительное время работать с большими напряжениями и при высокой температуре. Теорию газовых турбин и современную газотурбинную установку с горением при постоянном давлении разработал советский ученый профессор В. М. Маковский.



*Владимир Матвеевич Маковский*

(1870 – 1941)

Ученый-механик, специалист в области турбиностроения, доктор технических наук, заслуженный профессор УССР (1924), ректор Днепропетровского горного института (ныне Украинский национальный горный университет). Создатель научной школы в области турбиностроения. После переезда в 1930 г. из Днепропетровска, где он возглавлял кафедру теплотехники в Металлургическом институте, основал в

ХММИ кафедру турбиностроения. Скончался в январе 1941 г.

Кафедра турбиностроения стала центром подготовки высококвалифицированных специалистов – турбостроителей для ХТГЗ, который строили быстрыми темпами. Именно туда полностью были направлены первые два выпуска кафедры (28 человек).

Главным направлением исследований на кафедре турбиностроения стала проблема создания нового типа турбинного двигателя – газовой турбины. Коллектив кафедры взялся за разработку этой проблемы в условиях недоверия со стороны технической общественности, которая очень скептически и недоверчиво относилась к идее создания экономически выгодной стационарной газовой турбины.

Кафедра завязывает тесные отношения с Харьковским турбинным заводом, где Владимир Матвеевич был главным консультантом от АН УССР. В 1933 г. по инициативе Маковского при кафедре была создана первая в СССР газотурбинная лаборатория, которая позволила проводить уникальные исследования и испытания. Несмотря на отсутствие официального признания преимуществ нового двигателя,

кафедре под руководством и по проекту В. М. Маковского с привлечением студентов старших курсов и дипломников удалось в 1940 году построить на ХТГЗ по чертежам кафедры первую газовую турбину мощностью в 1000 кВт, а эффективность системы охлаждения обеспечивала начальную температуру газа 800° С.

Турбина была смонтирована в Горловке на шахте подземной газификации угля, где был создан филиал лаборатории кафедры. Успех был огромный – газовая турбина уже стала реальностью. Владимир Матвеевич Маковский стал основателем советской школы газотурбостроения. После его смерти в 1941 г. заведующим кафедрой турбиностроения ХММИ стал Я. И. Шнеэ.



### *Яков Исидорович Шнеэ*

(1902 – 1977)

Выдающийся ученый в области теплотехники, доктор технических наук (1947), профессор (1949), заведующий кафедрой турбиностроения ХПИ с 1941 по 1976 гг. В 1925 г. окончил Днепропетровский металлургический институт. С 1930 г. работал на Харьковском турбинном заводе заместителем начальника, а с 1932 г. – главным конструктором заводского бюро турбиностроения, отдел паровых турбин. В 1929 г. изучал опыт турбиностроения в Германии, а в 1934-м – в Великобритании. Принимал участие в создании первой в СССР промышленной газовой турбины Маковского. Под руководством Якова Шнеэ совместно с ОАО «Турбоатом» спроектированы уникальные последние ступени мощных паровых турбин для тепловых и атомных электростанций. Я. И. Шнеэ подготовил 35 кандидатов технических наук, из которых 7 впоследствии защитили докторские диссертации.

В годы Великой Отечественной войны ХММИ был эвакуирован в Красноуфимск (Башкирия). Несмотря на тяжелые времена, деятельность кафедры не остановилась. По заданию руководства страны ученые разрабатывали для боевых кораблей двигатель легкого типа – газовую турбину. Благодаря своим компактным размерам и отсутствию котла такая турбина идеально подходила для небольших кораблей.

Уже в 1943 году кафедра разработала проект и выполнила чертежи нового газотурбинного двигателя. По возвращении в Харьков и восстановления ХТГЗ и института работы над газотурбинным двигателем были продолжены. Опытная газовая турбина была изготовлена с большим опозданием, только в 1948 г. в Москве на заводе при Центральном научно-исследовательском институте технологии машиностроения. Испытания турбины проходили на ХТГЗ. В 1950-е гг. первый в Советском Союзе ГТД, предназначенный для боевых кораблей, был пущен в производство.

Однако мощность и экономичность ГТД все еще ниже, чем у паровых турбин, поэтому в стационарных установках и на транспорте они применяются очень редко. Зато именно создание газовой турбины явилось одним из основных условий, обеспечивших развитие турбореактивных и турбовинтовых двигателей, находящихся широкое применение в современной авиации. Газовые турбины турбореактивных двигателей отличаются исключительной простотой конструкции. Турбина в них используется непосредственно для создания тяги. История развития реактивной авиации выходит за рамки данного пособия.

#### **6.6. Деятельность харьковских ученых в области прочности турбомашин**

Применение турбин породило множество новых проблем теории колебаний. Крутильные колебания, которым подвержены паровые машины и ДВС, имеют для турбин меньшее значение, так как электрические генераторы, которые чаще соединяются с турбинами, редко имеют переменную нагрузку. Однако для судовых машин, соединенных с гребными винтами и турбин, соединяемых с механическими передачами, внешние силы могут иметь периодический характер и вызвать резонансные крутильные колебания в системе валопровода.

Гораздо важнее для турбинных валов колебания изгиба, так называемые **критические обороты**, на которых упругие восстанавливающие силы и моменты, возникающие при прогибе вала, уравновешиваются силами инерции и их моментами при обращении вокруг линии подшипников. В 1930-е гг. валы турбин строились в основном жесткие, для которых устранение колебаний изгиба требует, главным образом, хорошей балансировки ротора. Однако стремление облегчить конструкцию привело к применению в паровых турбинах «гибких» роторов, рабочие обороты которых выше первых критических скоростей и турбина во время пуска или остановки проходит резонанс. Задачи прохода через резонанс являются наиболее важными из области нестационарных колебаний.

Наиболее ответственными деталями турбин являются рабочие лопатки и диски. Они подвержены значительным динамическим воздействиям парового потока, неравномерность которого является причиной колебаний дисков и лопаток. Колебания лопаток часто приводят к их усталостному разрушению, которое может сопровождаться разрушением всей турбины. Проведение расчетов этих колебаний усложняется недостаточными знаниями об условиях закрепления лопаток у основания и обода и связывающего их бандажа. Поскольку лопатка является закрученным стержнем, их изгибные колебания сопровождаются крутильными. Еще большей сложностью отличается исследование колебаний дисков, которые происходят в двух измерениях. Именно проблемы лопаточных аппаратов турбин способствовало изучению колебаний с учетом внутреннего неупругого сопротивления.

Лопатки, диски, роторы паровых, а впоследствии и газовых турбин, стали на долгое время одними из основных объектов для приложения теории механических колебаний.

Поскольку на первом этапе развития паротурбостроения в СССР выпускались уже отлаженные турбины по лицензиям иностранных фирм, основными задачами стали вопросы прочности фундаментов под турбоагрегаты. Именно эти задачи стали первыми для видного украинского ученого, выпускника ХТИ А. П. Филиппова. В довоенный период вышли в свет четыре монографии Анатолия Петровича, посвященные колебаниям перекрытий и рамных каркасов, в том числе и предназначенных под турбоагрегаты.

В период восстановления турбостроения в 1940-е гг. для научного обеспечения восстановления и развития турбостроения в системе Академии наук УССР были созданы целевые научные организации. Среди них Лаборатория проблем быстроходных машин и механизмов, которая начала свою деятельность как самостоятельное научно-исследовательское учреждение с 1 октября 1944 г. в Киеве. Руководил Лабораторией академик Г. Ф. Проскура.

В 1948 г. Лабораторию проблем быстроходных машин и механизмов переводят в Харьков, объединив с ней Харьковский филиал Института теплотехники АН УССР. По новому штатному расписанию в состав Лаборатории вошел отдел динамики и прочности деталей. Переезд Лаборатории в Харьков активизировал ее сотрудничество с ведущим турбостроительным заводом СССР – ХТГЗ. В ее составе был организован сектор динамики частей машин и

механизмов, который возглавил А. П. Филиппов, избранный в 1945 г. членом-корреспондентом АН УССР. С переездом Лаборатории в Харьков также началось и ее сотрудничество с ХММИ. С 28 сентября 1948 г. руководитель отдела динамики и прочности деталей турбомашин А. П. Филиппов по совместительству становится заведующим кафедрой динамики и прочности машин. С приходом Анатолия Петровича научная тематика кафедры в основном стала направляться на изучение проблем турбостроения [11].

Большой вклад в исследование динамических процессов роторов турбогенераторов внес А. В. Дабагян. Докторскую диссертацию на тему «Некоторые колебательные процессы в роторах турбо- и гидрогенераторных установок при несимметричных и асинхронных режимах работы генератора», Арег Вагаршакович подготовил в 1959 г. и защитил в январе 1961 г. В своей работе он рассматривает энергетическую установку как единый преобразователь различных видов энергии. Им была разработана приближенная методика расчета колебаний ротора и установленного на нем лопаточного аппарата при различных электрических режимах: несимметричная нагрузка, асинхронный ход, мгновенный сброс [7].

Переход в турбостроении к более высоким рабочим температурам, давлениям и окружным скоростям потребовал всестороннего развития теоретических и экспериментальных вибрационных явлений в дисках и лопатках турбомашин. Стремление создать конструкции возможно меньшей материалоемкости привело к созданию турбомашин с равнопрочными узлами и деталями. В результате частотные характеристики отдельных конструктивных элементов оказались одного порядка. Это, в свою очередь, привело к сильной взаимосвязанности колебаний. В частности, одной из важных и интересных проблем динамической прочности роторов турбомашин стала проблема совместных колебаний рабочих лопаток и дисков.

Именно этой проблеме была посвящена кандидатская диссертация С. И. Богомолова. В своей работе он рассмотрел изгибные колебания диска постоянной толщины совместно с лопатками, центр кручения и центр тяжести поперечного сечения которых совпадают. Начав с частной задачи, Сергей Иванович продолжил исследования в этом направлении и в 1969 г. защитил докторскую диссертацию на тему: «Колебания дисков турбомашин». Проведя цикл экспериментальных исследований на специальных модельных дисках,



он показал, что достаточно полное теоретическое представление о динамических свойствах системы диск – лопатки можно получить только на основе совместного решения дифференциальных уравнений, описывающих изгибные колебания дисков и изгибно-крутильные колебания рабочих лопаток. Такой подход позволяет определить динамические свойства облопаченных дисков в широком диапазоне частот и выявить особенности взаимодействия рабочих лопаток и диска при совместных колебаниях.

Основной трудностью исследований совместных колебаний дисков и лопаток было то, что конструктивные особенности рабочих колес турбомашин не позволяли применить существовавшие методы численного решения дифференциальных уравнений даже с помощью ЭВМ. Поэтому коллективом сотрудников кафедры ДПМ ХПИ в составе С. И. Богомолова и его учеников А. М. Журавлевой и О. К. Сливы был разработан единый подход к решению задач о колебаниях сложных механических систем, основанный на матричном методе исследования колебаний, позволявшим наилучшим способом использовать ограниченные ресурсы ЭВМ того времени. Позже С. И. Богомоловым и А. М. Журавлевой были написаны две монографии, посвященные колебаниям сложных механических систем, описывающих колебания в паровых и газовых турбинах [7].

В довоенный период валы турбин строились в основном жесткими с небольшим превышением (~15 %) числа оборотов над критическими. Устранение опасности от колебаний изгиба для таких роторов требует, главным образом, хорошей балансировки. Однако стремление облегчить конструкцию привело к применению в паровых турбинах «гибких» роторов, рабочие обороты которых выше первых критических скоростей и турбина во время пуска или остановки проходит резонанс. Но амплитуды колебаний при этом меньше, чем на установившемся резонансном режиме, так как они не успевают развиться. Следовательно, простой расчет вынужденных резонансных колебаний даст завышенное значение амплитуд. Поэтому актуальной задачей для таких систем является изучение нестационарных колебаний, т.е. переходного процесса. Эти вопросы были подробно рассмотрены академиком АН УССР А. П. Филипповым и его учеником Е. Г. Голоскоковым. Результаты исследований были ими опубликованы в нескольких монографиях [7].

Именно потребностями турбостроения продиктована и тема кандидатской диссертации А. В. Бурлакова, посвященная исследованию напряженно-деформированного состояния элементов паропрово-

да в условиях ползучести материала. Анатолий Васильевич впоследствии стал крупным ученым в области теории упругости, пластичности и ползучести, доктором технических наук, профессором кафедры динамики и прочности машин ХПИ. В докторской диссертации Анатолий Васильевич продолжил изучение данной проблемы, рассмотрев ползучесть изотропных и анизотропных оболочек с учетом эффекта концентрации напряжений около отверстий. Система нелинейных дифференциальных уравнений, предложенная А. В. Бурлаковым в этой работе, позволяет исследовать неустановившуюся и установившуюся ползучесть широкого класса практически наиболее важных оболочек. Они являются общими для решения как осесимметричных, так и неосесимметричных задач.

Турбина работает в условиях высоких температур, а ее ротор вращается с большими оборотами. В связи с этим важнейшей проблемой в турбостроении является задач пластичности таких элементов турбомашин как оболочки вращения и диски. Этим вопросам посвящены работы А. Н. Подгорного и В. В. Бортового. В проблемной лаборатории при кафедре ДПМ для изучения этих вопросов была создана уникальная установка ВРД-500 для исследования прочности дисков и роторов турбомашин при больших скоростях вращения (до 30000 об/мин) и высоких температурах (до 900°C). Установка позволила изучить некоторые пространственные задачи термоупругости и термопластичности. Получить основные теоретические зависимости для определения напряженного состояния вращающегося, неравномерно нагретого цилиндра конечной длины (применительно к роторам турбомашин). Также была рассмотрена и решена задача об определении разрушающих оборотов и времени до разрушения вращающихся нагретых дисков турбомашин. Проведенные эксперименты на разгонной установке, позволили определить влияние некоторых конструктивных факторов на несущую способность дисков турбомашин.

За цикл работ в области прочности энергетических машин и внедрение их в практику турбостроения в 1984 г. сотрудники Инженерно-физического факультета ХПИ и Института проблем машиностроения АН УССР С. И. Богомолов, Е. Г. Голоскоков, А. Н. Подгорный и А. П. Филиппов (посмертно) удостоены звания Лауреатов Государственной премии УССР.



И. М. Бабаков    В. М. Майзель    А. Н. Подгорный    Е. Г. Голоскоков



А. П. Филиппов    А. В. Дабагян    А. В. Бурлаков    С. И. Богомолов

Рис. 6.4. Ученые инженерно-физического факультета ХПИ

### 6.7. Судовые турбины

К началу XX века судовые паровые машины достигли своего расцвета, их мощность достигла 20 000 л. с. Именно в это время они стали вытесняться паровыми турбинами и двигателями внутреннего сгорания, КПД которых выше.

Первым в морском флоте применил турбину создатель реактивной паровой турбины Парсонс. В 1894 г. он оснастил паровой турбиной небольшое опытное судно «Турбиния» водоизмещением всего 44,5 т и длиной около 32 м. При этом вал турбины непосредственно был соединен с гребным винтом. Это стало большой проблемой, поскольку КПД гребного винта тем выше, чем ниже его обороты и больше размер.

Когда «Турбиния» вышла на ходовые испытания, начались проблемы с винтами. Инженеры впервые столкнулись с явлением кавитации — из-за высокой частоты вращения винта началось его

проскальзывание. В результате скорость судна, которая, по расчетам, должна была превысить 30 узлов, оказалась даже меньше 20. Однако Парсонс не опускал руки, и после многочисленных экспериментов ему удалось подобрать подходящие винты. На «Турбинии» установили три гребных вала, каждый из которых вращала отдельная турбина. На каждом валу последовательно было установлено три гребных винта, и в 1896 г. на испытаниях катер развил скорость 32 узла (59,26 км/час), а на коротком участке даже 34,1 узла (63 км/час).

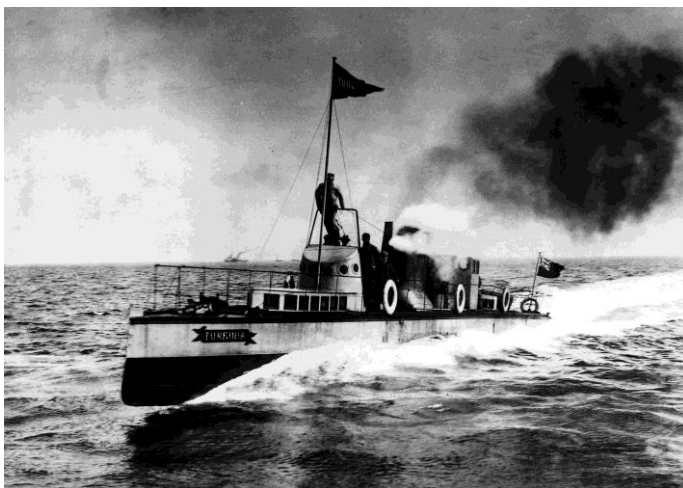


Рис. 6.5. Судно «Турбиния»

Применение турбины в качестве силовой установки малых быстроходных судов имело целый ряд преимуществ перед поршневым паровым двигателем. Это меньшие вес и габариты при аналогичной мощности, отсутствие вибраций от неуравновешенных движущихся частей, простота эксплуатации, увеличение свободного места в машинном отделении. Однако из-за высоких оборотов винта расход топлива, особенно при движении малым ходом у турбинных кораблей был выше. Опыт их эксплуатации также показал, что даже при самом быстром ходе судна число оборотов гребного винта, далеко уступает числу оборотов обычных стационарных турбин. Для понижения скорости судовой турбины стали увеличивать размеры турбинных колес, что в свою очередь, влекло за собой увеличение всех размеров турбины.

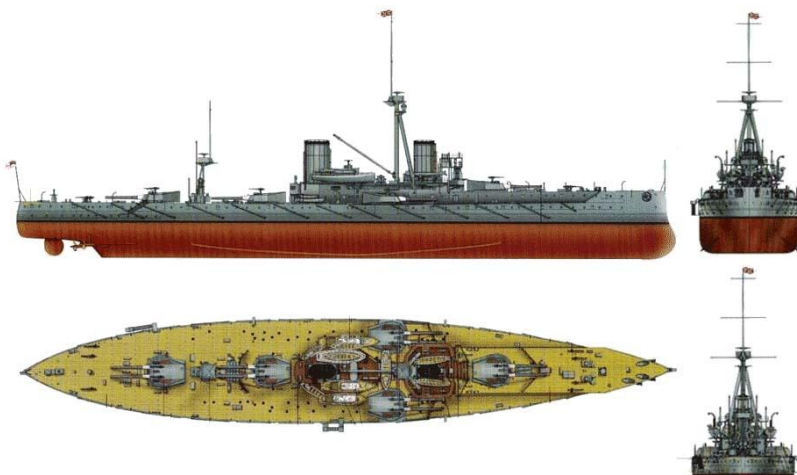


Рис. 6.6. Линейный корабль «Дредноут», Великобритания, 1906 г. Длина 160,74 м, ширина 25 м, осадка 9 м, водоизмещение 21 067 т, мощность машин (4 турбины Парсонса) 26 350 л. с., скорость 21,6 узла, бронирование (главный пояс): 179 – 279 мм, вооружение: 10 305-мм орудий, 27 – 76-мм, 20 – 75-мм, 24 – 47-мм, 8 – 37-мм, 2 – 63,5-мм десантных орудия, 4 пулемета, 5 торпедных аппаратов калибра 456 мм.

Тем не менее, в 1906 году в Англии был построен турбинный броненосец «Дредноут» (см. рис. 6.6), давший начало новому классу линейных кораблей – дредноутов. Это первый корабль, в котором был учтен опыт Русско-японской войны, по своей огневой мощи стоил целой эскадры броненосцев. Вслед за «Дредноутом» последовали огромные трансатлантические лайнеры «Мавритания» и «Лузитания», вошедшие в строй в 1907 г. (см. рис. 6.7). Они также были оснащены турбинами Парсонса. Однако турбинная установка представляла собой сложное, громоздкое и тяжелое сооружение. Во-первых, турбины «Мавритании», делавшие около 200 оборотов в минуту, были огромных размеров. Кроме главных турбин нужно было иметь еще турбины для малого хода, необходимого при маневрировании судна, поскольку тихий ход основные турбины дать не могли.

Нововведения коснулись и других классов боевых кораблей. Строятся новые скоростные крейсера, оснащенные турбинными силовыми установками. Водоизмещение эскадренных миноносцев возрастает в несколько раз и достигает 1500 т. Эти большие эсминцы вооружаются 100-мм орудиями и большим количеством торпедных аппаратов и имеют при этом самую высокую скорость. Так русский

эсминец «Новик», оснащенный турбинной силовой установкой поставил в 1911 г. мировой рекорд скорости – 37,3 узла (см. рис. 6.8.

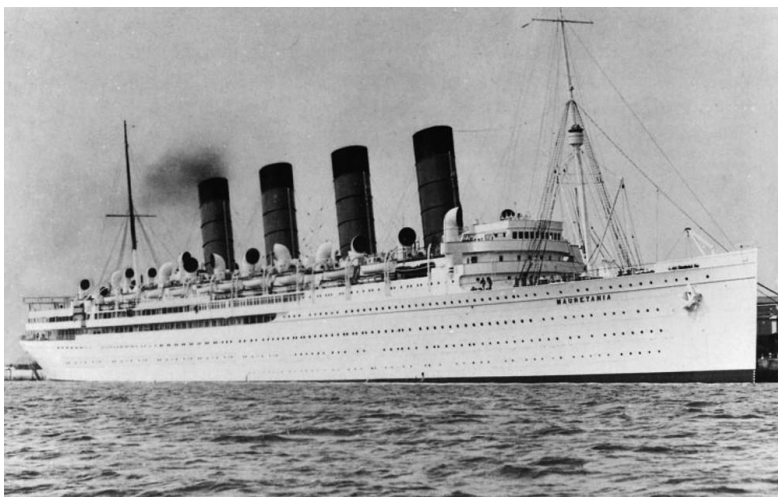


Рис. 6.7. Турбинный лайнер «Мавритания». Длина 240 м, вместимость 32 000 брутто-регистражных тонн, мощность четырех паровых турбин Парсонса 68 000 л. с., скорость хода 26,06 узла.

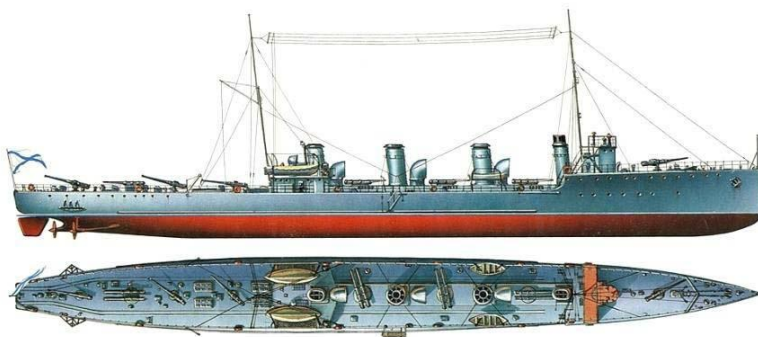


Рис. 6.8. Эскадренный миноносец «Новик», Россия, 1911 г. Длина 102,4 м, ширина 9,5 м, осадка 3,5 м, водоизмещение 1360 т, мощность машин (3 паровых турбины «А. Е. Г. Кёртис-Вулкан») 42 000 л.с., скорость 37,3 узла, вооружение: 4 102-мм орудия и 4 двухтрубных торпедных аппарата калибра 457 мм.

Поскольку для маневрирования судна необходим режим обратного хода, пароход должен иметь еще турбину обратного хода. Выходом из создавшегося положения стало применение понижающего редуктора. В 1909 г. Парсонс для сохранения числа оборотов гребного вала впервые применил к своим турбинам зубчатую, геликоидальную (косозубая передача со спиральными зубьями) передачу, предложенную Лавалем для своей турбины. Опыт этот оказался настолько удачным, что все судостроение стало применять соединение вала турбины с гребным винтом через понижающий редуктор, который выполняется в едином с турбиной турбозубчатом агрегате (ТЗА). Это позволило задавать турбине оптимальный режим работы и сохранить малые обороты для гребных винтов.

Другим путем для решения проблемы стало применение электропередачи. Одним из первых кораблей с такой силовой установкой стал американский авианосец «Лексингтон» (см. рис. 6.9).

После Второй мировой войны в качестве главных двигателей на судах стали применять газовые турбины. Их достоинством являются малые размеры и соответственно меньшая масса по сравнению с паросиловыми установками. Однако невысокий КПД и большая температура рабочего тела, требующая применения дорогих высокопрочных материалов.



Рис. 6.9. Авианосец «Лексингтон», США, 1927 г. Длина 270,6 м, ширина 32 м, осадка 7,5 м, водоизмещение 33 000 т, бронирование: борт 178 мм, палуба – 76 мм; вооружение: 8 203-мм орудий и 12 127-мм, 78 самолетов. Мощность силовой установки 180 000 л. с.; скорость 33 узла, дальность плавания 12 000 миль, при скорости 14 узлов.

ГТД устанавливаются в основном на небольших боевых кораблях. Еще один объект для их применения – суда на подводных крыльях или на воздушной подушке. Создание судов на подводных крыльях связано с именем **Ростислава Евгеньевича Алексеева** (1916–1980). В начале 1943 г. он создал на заводе «Красное Сормово», г. Горький (Нижний Новгород) новое подразделение под названием «Гидролаборатория», преобразованное 17 апреля 1951 г. в конструкторского бюро – ныне Центральное Конструкторское бюро по судам на подводных крыльях имени Р. Е. Алексеева.

В 1949 г. Алексеев в инициативном порядке разрабатывает проект первого речного пассажирского судна на малопогруженных крыльях. В последующее время КБ Алексеева и завод «Красное Сормово» становятся мировым лидером по производству судов на подводных крыльях, на воздушной подушке, экранопланов и др. продукция завода экспортируется в десятки стран и пользуется огромной популярностью. Особое место среди этих судов занимают суда, оснащенные газотурбинными двигателями.



Рис. 6.10. Газотурбоход «Буравестник» предназначен для скоростных пассажирских перевозок на транзитных и местных линиях рек и водохранилищ протяженностью до 500 км. Длина – 43,2 м, ширина – 7,4 м, осадка на плаву – 2,0 м, осадка при ходе на крыльях – 0,6м. Скорость – 90 км/ч. Оснащен двумя газотурбинными двигателями АИ-20 мощностью 2700 л.с. Рассчитан на 150 пассажиров. «Буравестник» построен в единственном экземпляре и эксплуатировался на Волге с 1964 г. до конца 1970-х гг.



## 7. Танковое двигателестроение

### 7.1. Первый период танкостроения

Важнейшим агрегатом танка является двигатель. Танки, за исключением некоторых современных, имеющих газотурбинные двигатели (ГТД), оснащаются двигателями внутреннего сгорания. В годы первой мировой войны танки использовались исключительно для поддержки атакующей пехоты, и их скорость ограничивалась скоростью пешехода. Для таких машин было вполне достаточно двигателей мощностью от 40 до 150 л.с. Поэтому до конца 1920-х гг. на танках ставились карбюраторные моторы в основном автомобильные, серийно выпускаемые в то время. В некоторых танках применялось даже не по одному, а по два и более автомобильных двигателя. Это было связано либо с отсутствием одного двигателя необходимой мощности и тогда применялся единый агрегат из спаренных двигателей. В другом случае это определялось принятой конструктивной схемой машины, когда каждый из двух двигателей приводил в движение одну гусеницу танка.

Однако двигатель танка работает в более жестких условиях, чем автомобильный. Как показали исследования Московского автомеханического института, проведенные в конце 1940-х гг., двигатели грузовых автомобилей 25 % времени работают с нагрузкой до 15 % максимальной мощности, 65 % времени – от 15 до 75 % и только 10 % времени – свыше 75 % максимальной мощности. Таким образом, 90 % времени двигатель грузового автомобиля работает с неполной нагрузкой. В танке же двигатель до 30 % времени работает на максимальной мощности и лишь до 15 % времени – на холостых оборотах и малых нагрузках. Основное же время эксплуатации (до 55 %) нагрузки достигают 80 % максимальной мощности. Кроме того, двигатель танка испытывает более частые изменения нагрузочного режима работы. При движении танка нет использования «наката» машины, характерного для автомобиля. Более высокий уровень нагрузок вследствие наличия в танке гусеничного движителя, удары при преодолении неровностей местности и препятствий – все это в значительной степени влияет на ужесточение условий эксплуатации двигателя танка, по сравнению с двигателем автомобиля [3].

К 1930-м годам танки становятся основной ударной силой сухопутных войск. Появилась новая концепция применения бронетанковой техники. Танки предполагалось использовать уже не только для сопровождения атакующей пехоты, но и для выполнения самостоятельных задач, для чего стали создаваться новые типы танков,

в частности, тяжелые танки прорыва и быстроходные крейсерские или маневренные. Новые машины потребовали более мощных двигателей, а за неимением специальных танковых, конструкторы использовали авиационные бензиновые моторы, так как только в авиации имелись легкие двигатели мощностью 300–500 л.с. Дополнительным аргументом служила возможность получения определенной экономической выгоды, ведь на танкостроительные заводы часто направляли отработавшие свой срок на самолетах и прошедшие переборку авиадвигатели, отрегулированные на меньшую мощность для повышения моторесурса.

Авиационные моторы еще больше, чем автомобильные, отличались от танковых по режимам работы. Авиамотор, в отличие от двигателей наземных транспортных средств, работает в условиях малой запыленности воздуха, не испытывая ударных нагрузок, передаваемых от трансмиссии при сравнительно нечастых управляющих воздействиях. Высокая частота вращения коленчатого вала авиационного двигателя требовала больших передаточных чисел в понижающих редукторах трансмиссии танков. Но самым главным недостатком бензиновых авиамоторов была их высокая пожароопасность, обусловленная летучестью и взрывоопасностью паров применяемого в них высокооктанового авиационного бензина. Однако авиационные моторы широко использовались в танках, поскольку альтернативы по удельной мощности им не существовало.

Более привлекательными для танков были дизельные двигатели. Но производимые до 1930-х гг. дизели большой мощности, были тихоходными, предназначались в основном для судов или стационарных установок и из-за своих габаритов не могли быть установлены в танк. Однако в начале 1930-х гг. ведущие промышленные державы все больше стали внедрять дизели в грузовиках и автобусах. Были начаты разработки и авиационных дизелей.

На первой Всесоюзной дизельной конференции, состоявшейся в октябре 1933 г., молодой конструктор из Центрального института авиационного моторостроения (ЦИАМ) А. Д. Чаромский сделал доклад о перспективах авиационного дизелестроения. В нем он отметил, что «при одинаковой степени надежности расчетные сечения нагруженных деталей (картер, вал, головка блока цилиндров, поршень, шатун и др.) у двигателя с воспламенением от сжатия выше, чем у бензинового. При мощности 1 000 л.с. и четырехтактном цикле вес дизеля 1 000 кг, а бензинового двигателя – 700 кг. Однако по расходу топлива бензиновый двигатель никогда не сможет конкурировать с

нефтяным<sup>\*</sup>. В связи с этим дизельный двигатель выгоден только при дальних перелетах продолжительностью свыше пяти часов». В своем докладе Алексей Дмитриевич наметил и пути совершенствования рабочего процесса авиадизеля: наддув и применение двухтактного цикла.

Хотя авиадизель разрабатывался во многих странах, а в некоторых и серийно выпускался, большого распространения он не получил, так как в довоенный период его мощность еще не удовлетворяла предъявляемым требованиям, а в послевоенный период авиация перешла на ГТД. Однако, опыт, накопленный при разработке авиационных дизелей, послужил конструкторам при разработке дизелей для танков.

## **7.2. Создание первого танкового дизеля В-2**

Преодолеть трудности создания танкового дизель-мотора удалось не сразу. Создать специальный танковый дизель перед войной удалось только советским конструкторам, и только советские танки в годы войны оснащались специальными дизелями. После войны основным двигателем в мировом танкостроении стал дизель, каковым и остается поныне. Приоритет в создании первого в мире специального танкового дизеля принадлежит Харьковскому паровозостроительному заводу. Именно здесь в предвоенные годы был создан танковый дизель В-2, который устанавливался на всех средних и тяжелых советских танках в годы войны. Именно его применение позволило советским конструкторам создать лучшие в мире танки.

Производство дизелей на ХПЗ началось в 1911 г., завод является старейшим предприятием, производившим ДВС в Украине. У истоков дизелестроения, развернувшегося на ХПЗ, стоял В. Т. Цветков. В дореволюционный период и в первые годы советской власти здесь строились только лицензионные дизели станинного типа с компрессорным смесеобразованием, в основном фирм «Зульцер» и MAN. Двигатели были четырехтактные, тихоходные (160 – 225 об/мин) и имели от одного до четырех цилиндров. Использовались они в основном как стационарные установки на промышленных предприятиях, водокачках, мельницах и т.п. В годы Гражданской войны дизелестроение на ХПЗ было прекращено и возобновилось только в 1923 г., а к 1928 г. производство дизелей на ХПЗ было восстановлено. В годы первой пятилетки (1928 – 1932) завод освоил

---

<sup>\*</sup> поскольку некоторые дизели в то время могли работать на сырой нефти, их иногда называли нефтяными двигателями

новую продукцию – двухтактные бескомпрессорные дизели типа «Зульцер» (Швейцария). Выйдя на первое место в СССР по производству паровозов, ХПЗ стал также и крупным производителем дизелей. Это производство и стало основой для создания двух уникальных семейств танковых дизелей, равных которым не было в мировом танкостроении [4].



### *Василий Трофимович Цветков*

(1887 – 1954)

Известный ученый в области двигателей внутреннего сгорания, доктор технических наук (1953), профессор (1925). В 1911 г. окончил с отличием Харьковский технологический институт. С 1911 г. в течение 20 лет работал на ХПЗ, где под его руководством было выпущено множество различных дизелей. Именно Василий Трофимович начал формировать Харьковскую школу

двигателестроения. По инициативе В. Т. Цветкова в 1929 г. в ХТИ была создана лаборатория ДВС, а в 1930 г. основана кафедра ДВС.

После выхода в 1929 г. постановления ЦК ВКП(б) и Совнаркома «О состоянии обороны СССР» на ХПЗ было начато производство танков. Опытный средний танк Т-12, выпущенный в 1931 г. был оснащен авиационным бензиновым двигателем 8Fd французской фирмы «Испано-Сюиза». На серийный танк Т-24 устанавливали аналогичный двигатель М-6, производившийся на Запорожском заводе № 29.

Но вскоре ХПЗ перешел на выпуск легкого быстроходного колесно-гусеничного танка БТ-2, оснащавшегося, как и его прототип, танк Кристи американским двигателем «Либерти». На следующих танках БТ-5 стояли уже их отечественные аналоги – авиамоторы М-5. Очередная модификация БТ-7, а также выпускавшиеся на ХПЗ тяжелые пятибашенные машины Т-35 конструкции Ленинградского завода имени Ворошилова получили V-образный 12-цилиндровый авиамотор М-17 жидкостного охлаждения (лицензионный BMW-VI). Этот же двигатель применялся и в среднем танке Т-28 производства Кировского завода. Таким образом, уже в 1930-е гг. танковые моторы

были унифицированы. Для оснащения танков часто поступали двигатели, отслужившие свой срок (100 часов) в авиации.

Высокая мощность и хорошие массогабаритные показатели авиационных двигателей М-17 вполне удовлетворяли требованиям их применения в танках всех типов, однако они были недостаточно выносливы для тяжелых условий эксплуатации в танке и недостаточно экономичны по расходу топлива. Но самым главным недостатком бензиновых авиамоторов была их высокая пожароопасность, обусловленная летучестью и взрывоопасностью паров применяемого в них высокооктанового авиационного бензина.

Весной 1931 г. ВСНХ СССР предложил Коломенскому и Харьковскому паровозостроительным заводам взяться за производство автотракторного дизеля мощностью не ниже 300 л.с. В техническом задании указывалась схема – V-образный, 12-цилиндровый с номинальным режимом 1 600 об/мин.

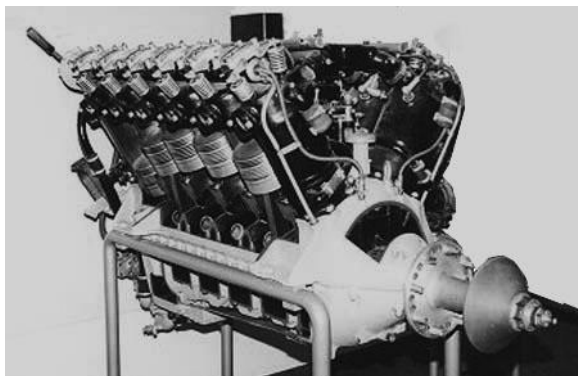


Рис. 7.1. Авиамотор BMW-VI

В постановлении правительства двигатель назывался автотракторным, но это было сделано из соображений секретности, новый дизель предназначался для танков, так как ни тракторов, ни автомобилей, требующих такого мощного двигателя, в то время не было. Коломенский завод, несмотря на большой опыт производства дизелей (с 1904 г.), за эту работу не взялся.

Дизельный отдел ХПЗ, руководимый К. Ф. Челпаном, приступил к заданию, когда прототипа для такого мотора ни в СССР, ни за рубежом не было. В работе использовался опыт, накопленный на ХПЗ при производстве стационарных и судовых дизелей, а также карбюраторных двигателей тракторов и тягачей. Не случайно главные разме-

ры нового дизеля – диаметр цилиндра 150 мм и ход поршня 180 мм были приняты такими же, как и у карбюраторного двигателя тяжелого артиллерийского тягача «Ворошиловец» мощностью 180 л.с., что позволило применять уже имеющееся оборудование и оснастку [2].



### *Константин Федорович Челпан*

(1899 – 1938)

Родился 27 мая 1899 года в селе Чердаклы Мариупольского уезда Екатеринославской губернии (ныне село Кременевка, Володарский район, Донецкая область) в греческой семье. После окончания в 1919 году Мариупольского реального училища и участия в Гражданской войне поступил в ХТИ, который окончил с отличием в 1924 г. Работал на ХПЗ конструктором, главным конструктором, начальником конструкторского бюро, начальником дизельного отдела. В 1928 – 1929 годах стажировался в Германии, Швейцарии и Англии. 15 декабря 1937 г. К. Ф. Челпан арестован по делу о «греческом заговоре». Как «организатор вредительской группы, систематически срывающий задания по дизелестроению», приговорен Комиссией НКВД СССР к расстрелу. Приговор приведен в исполнение 11 марта 1938 г. в Харьковской тюрьме. Портрет К. Ф. Челпана сохранился только на групповой фотографии участников первой Всеукраинской конференции по тяжелым ДВС (1931 г.)

В Советском Союзе несколько организаций занимались разработкой авиационного дизель-мотора. Над такими двигателями работали и в Москве в ЦИАМе, и в Харькове в Украинском научно-исследовательском авиадизельном институте (УНИАДИ), образованном на базе лаборатории ХТИ. Этот институт, которым руководил бывший директор ХТИ профессор Я. М. Майер, занимался созданием четырехтактного V-образного 12-цилиндрового авиационного дизеля АД-1 мощностью 500 л.с. при 1 600 об/мин. Однако дальше испытаний одной секции создатели этого двигателя не продвинулись.



## *Яков Моисеевич Майер*

(1893 – 1988)

Специалист в области двигателестроения, профессор (1929). Окончил ХТИ (1924). Возглавлял Совет комиссаров вузов Харькова. Работал инженер-конструктор и зав. отдела тепловых двигателей ХПЗ (1924 – 1928). В 1928 – 1929 ректор ХТИ. В 1929 г. возглавил лабораторию ДВС при ХТИ, преобразованную в УНИАДИ. С 1939 г. заведующий кафедрой теории механизмов и машин, одновременно с 1941 г. заведующий кафедрой ДВС ХММИ. После восстановления в 1950 г. ХПИ профессор кафедры ДВС, где создал и возглавил базовую лабораторию тракторных и комбайновых двигателей. В 1962 вышел на пенсию, однако остался профессором-консультантом кафедры ДВС ХПИ.

Поскольку у авиационного и танкового дизелей было много общего, усилия УНИАДИ и ХПЗ решили объединить. Специалисты УНИАДИ должны были помочь заводу в отработке рабочего процесса, а ХПЗ, в свою очередь, должен был изготовить поковки и литые детали для опытных образцов авиационного дизеля и помочь с налаживанием технологии. В силу ряда причин вовремя заказы УНИАДИ, размещенные на ХПЗ, выполнены не были. В итоге авиадизель был создан в ЦИАМе, возможности которого многократно превышали возможности УНИАДИ.

На ХПЗ дело создания танкового дизеля шло успешнее. К концу 1934 г. несколько дизелей БД-2 успешно прошли испытания на тягаче «Ворошиловец», катерах и танках БТ-5. За успехи в создании танкового дизеля начальник дизельного отдела К. Ф. Челпан и начальник КБ Я. Е. Вихман среди других руководителей и сотрудников завода были награждены орденом Ленина.

Но вслед за первыми успехами начался длительный период доводки двигателя, которая, как правило, сложнее, чем его разработка. Не случайно в акте один из членов комиссии по дизелю БД-2 записал: «Мало двигатель построить, нужно его довести, а доводка во много раз труднее, чем сама постройка».



## *Яков Ефимович Вихман*

(1896 – 1976)

Выпускник ХТИ (1924 г.). С 1924 г. работал на ХПЗ конструктором, старшим конструктором, заведующим конструкторским подотделом дизельного отдела завода. В 1931 г. назначен начальником конструкторского бюро по дизельному двигателю. С 1939 г. заместитель главного конструктора завода №75. В годы Великой Отечественной войны завод был эвакуирован в Челябинск и вошел в состав Челябинского Кировского завода.

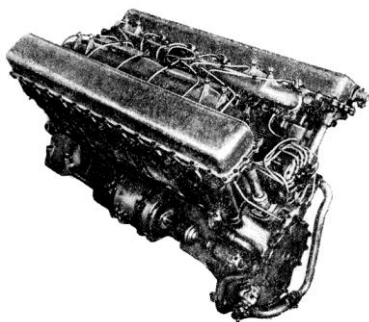


Рис. 7.2. Опытный дизель БД-2

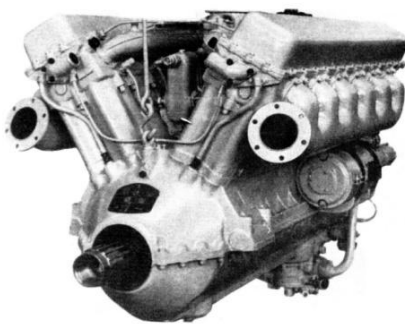


Рис. 7.3. Танковый дизель В-2-34

При создании быстроходных облегченных двигателей конструкторы столкнулись с новыми проблемами, которые не встречались в тяжелых тихоходных стационарных и судовых дизелях. Облегченные авиационные и танковые двигатели имеют более низкие собственные частоты и в то же время большие обороты. В связи с этим в рабочем диапазоне могут возникнуть резонансные колебания. Так как на ХПЗ не было опытно-исследовательской базы, ему был передан УНИАДИ, получивший название НИИ-466. Ценность его для завода заключалась не только в привлечении квалифицированных специалистов, но и в том, что НИИ-466 имел хорошо оборудованные исследовательские лаборатории, такие как моторная (испытательная станция с тремя



стендами), топливной аппаратуры, динамическая, химмотологии и опытную базу с обрабатывающими и сборочным цехами. Были привлечены также и сотрудники ЦИАМ. Именно специалистам НИИ-466 и ЦИАМ пришлось доводить конструкцию танкового дизеля и налаживать его производство.

Стендовые испытания выявили целый ряд недостатков. Среди них были и претензии к динамической прочности двигателя, а именно, недостаточная жесткость картера, блока и гильзы цилиндров. В связи с этим корпус двигателя был усилен. Первые шатуны двигателя БД-2 были вильчатого типа и ломались, не выдерживая высоких нагрузок. Были проведены исследования динамики шатунно-поршневой группы дизеля (исполнители сотрудники НИИ-466 Ю. А. Гопп и Н. М. Глаголев). Когда перешли на прицепные шатуны с небольшой разноходностью по правому и левому блокам, поломки прекратились. Особенно много было проблем с самой нагруженной деталью двигателя – коленчатым валом, например, его поломка по щекам. Коленчатые валы авиамооторов, как правило, были со щеками овальной формы, и на двигателе БД-2 первые валы сделали со щеками такой же формы. Однако жесткая работа дизеля и более высокие нагрузки, чем в авиационных двигателях, приводили к поломкам. Для устранения этого дефекта перешли к щекам круглой формы.



*Юрий Аркадьевич Гопп*

(1906 – 1972)

Известный ученый в области механики, динамики машин и прикладной теории колебаний, доктор технических наук (1953), профессор. Один из организаторов Омского машиностроительного института. Выпускник ХММИ по специальности гидромеханика (1930). Ученик Я. М. Майера, занимался проблемами колебаний систем с ДВС и виброгашения. Принимал участие в создании первого в мире танкового дизеля – В-2 [5].

А самым важным недостатком была невозможность работы двигателя в интервале 900 – 1 200 об/мин из-за сильных крутильных колебаний коленчатого вала, на котором образовывался узел колебаний. Коленчатый вал был усилен, однако проблема крутильных колебаний осталась, только резонансная зона сместилась выше, оставаясь при этом в рабочем диапазоне. Справиться с этим при доводке двигателя не удалось, поэтому было решено на тахометре в соответствующей зоне нанести красную зону с надписью «Проходить быстро», напоминаящую механику-водителю о том, что на данных оборотах долго работать не рекомендуется во избежание усталостного разрушения коленчатого вала.

До 1937 г. единичные дизель-моторы изготавливали лучшие рабочие – станочники и сборщики. Но при организации серийного производства двигателей возник еще ряд проблем. Все работы производились в непригодных для этого цехах, а строительство моторного цеха затягивалось, так как не была еще готова конструкция двигателя.

Все эти неудачи происходили в 1936–1938 гг., когда на заводе развернулись массовые репрессии. В числе репрессированных были и создатели дизеля В-2 – в 1938 г. были расстреляны К. Ф. Челпан и начальник дизельного технологического бюро А. А. Краснов. Пострадал от репрессий и сотрудник ЦИАМ А. Д. Чаромский, консультировавший специалистов УНИАДИ и ХПЗ по вопросам рабочего процесса в дизелях. После вынесения приговора он был переведен в особое техническое бюро в Тушино – так называемая «Туполевская шарашка», где разработал опытный оппозитный дизель ОН-4, ставший основой танкового дизеля нового поколения.

Одной из причин затруднений и затягивания процесса доводки дизеля хроническая, проявлявшаяся и в послевоенный период, недооценка руководством отрасли, да и промышленности в целом, значения опытно-конструкторских и исследовательских организаций, опытных баз предприятий. За рассматриваемый период наблюдалось непропорциональное развитие массового производства двигателей в ущерб опытному производству и проведению необходимых

исследований. В результате этого доводка изделий повсеместно проводилась в условиях серийного производства.

И все-таки в 1938 г. танковый двигатель, получивший наименование В-2, был внедрен в серийное производство. В начале 1939 г. дизельное производство из состава ХПЗ было выделено в самостоятельный дизельный завод № 75 Наркомата авиационной промышленности. Директором нового завода назначили авиационного инженера Г. Д. Брусникина, главным инженером – И. С. Могилевского. На заводе было создано Управление главного конструктора, которое возглавил Т. П. Чупахин, а серийное конструкторское бюро по дизелям В-2 возглавил И. Я. Трашутин. Опытным конструкторским бюро по дизелям стал руководить И. В. Асланов. Заводской НИИ-466 (бывший УНИАДИ) был передан заводу № 75 и стал называться отделом 1600.

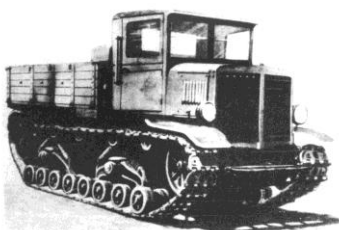
Двигатель является наиболее сложным и ответственным агрегатом боевой гусеничной машины и на его разработку уходит зачастую больше времени, чем на сам танк. Зато удачный двигатель определяет развитие бронетанковой техники на многие годы и служит основой для создания самых различных образцов техники. Так было и с дизелем В-2, модификации которого применялись в танках разных типов и в других объектах, в том числе и мирного назначения. 1 сентября было принято решение о серийном выпуске танкового дизеля В-2, и в том же году он был установлен на танке БТ-7М вместо авиационного бензинового мотора М-17Т.

Именно то обстоятельство, что двигатель В-2 был создан как многоцелевой, позволило быстро развернуть его в многочисленное семейство дизелей, предназначенных для различных типов машин и выполненных на одной базе. К июню 1941 г., через 20 месяцев после начала серийного производства, завод № 75 освоил пять модификаций дизеля: для легкого танка БТ-7М, среднего танка Т-34, тяжелого танка КВ, артиллерийского тягача «Ворошиловец», дизелей с левым и правым направлением вращения для боевых катеров и, наконец, однорядного шестицилиндрового для легкого танка Т-50 (см. табл. 7.1).

Таблица 7.1

## Танки с двигателями семейства В-2

Марка двигателя	Год	Мощность, л.с.	Режим, об/мин	Машины
В-2	1938	450	1 800	БТ-7М
В-2/34	1939	500	1 800	Т-34, СУ-85, СУ-100, СУ-122
В-2В	1939	375	1 500	Арт. тягач «Ворошиловец»
В-2К	1939	600	2 000	КВ-1, КВ-2, КВ-1С, КВ-85, СУ-152
В-4	1939	250	1 800	Т-50
В-2П, В-2Л	1939	400	1 650	Катер ПК-1
В-2ИС	1943	520	1 800	ИС-1, ИС-2, ИСУ-152
В-44	1944	500	1 950	Т-44
В-55	1945	520	1 950	Т-54, Т-55, ЗСУ-57-2



Артиллерийский тягач «Ворошиловец»    Легкий танк БТ-7М



Средний танк Т-34 образца 1940 г.

Тяжелый танк КВ-1

Рис. 7.4. Первые машины, оснащенные дизелем В-2

### 7.3. Развитие советского танкостроения

Комплектование всех средних и тяжелых танков, в том числе и вновь создаваемых танков серии ИС, а также самоходных артиллерийских установок (СУ) на их базе одним и тем же дизелем типа В-2 сыграло очень важную роль в обеспечении танкостроительных заводов моторами и облегчило ремонт и эксплуатацию бронетанковой техники в тяжелейшие годы Великой Отечественной войны.

Возникает вопрос, почему ни до войны, ни в ее ходе промышленность ни одной страны не смогла создать не то что равного советскому дизелю В-2, а просто никакого дизеля, пригодного для установки в танк, хотя целесообразность создания танка с двигателем, работающим на тяжелом дизельном топливе, перед легковоспламеняющимся бензиновым двигателем, была очевидной. При этом еще до войны во многих странах были созданы вполне работоспособные авиационные дизели. Особенно в этом деле преуспели Германия и США.

Безусловно, конструкторам танков были ясны преимущества дизеля в танке перед бензиновым мотором. Однако ни в одной стране, кроме СССР, специального танкового дизеля не создали. Причины на то были разные. Так в Великобритании и США основную ставку в обороноспособности делали на военно-морской флот и авиацию, и танкостроение там находилось в состоянии «спячки». Когда надвигающаяся после оккупации почти всей Западной Европы угроза вторжения заставила англичан и американцев заняться выпуском современной техники, именно отсутствие специальных танковых двигателей стало причиной невысокого качества танков. Британские конструкторы применяли на своих крейсерских танках авиационный мотор «Либерти» мощностью до 400 л.с., низкая надежность которого стала бичом для английских танкистов. Только к концу войны им удалось, опять на основе авиационного мотора «Мерлин», создать надежный 12-цилиндровый двигатель «Роллс-Ройс Метеор» мощностью 600 л.с.

Что касается США, то при огромных объемах выпуска танков даже в богатой Америке не хватало авиационных двигателей, и поэтому силовые установки танков были самой разнообразной комплектации. На самые массовые средние танки М3 и М4 устанавливался не очень подходящий для танка звездообразный 9-цилиндровый 350-сильный авиадвигатель «Райт» R-975 воздушного охлаждения. Во время войны из-за недостатка этих двигателей фирма

«Крайслер» разработала двигательную установку А-57 «Мальтибэнк» мощностью 370 л.с, которой оснащались модификации М3А4 и М4А4. Она представляла собой пять автомобильных двигателей, объединенных в одном блоке и работающих на общую коробку передач. На танке М4А3 применялся V-образный 8-цилиндровый карбюраторный двигатель жидкостного охлаждения «Форд» ГАА рабочим объемом 18 026 см<sup>3</sup> и мощностью до 500 л.с. при 2600 об/мин.

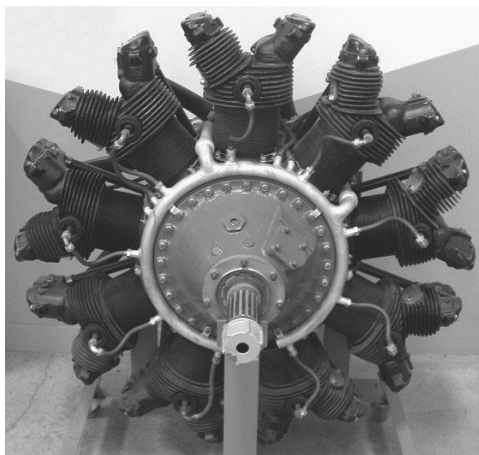


Рис. 7.5. Авиамотор «Райт» R-975

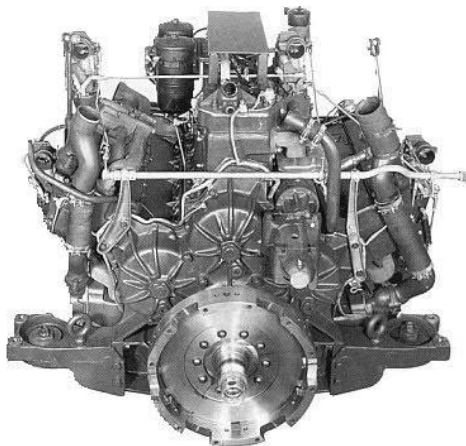


Рис. 7.6. Двигательная установка А-57 «Мальтибэнк»

Американцы применяли также авиационные и автомобильные дизели. Так радиальный дизель T-1020 «Гиберсон» мощностью 210 л.с. использовался для легких танков М2 и М3. В американских средних танках М3А3 и М4А2 в 1941 – 1942 гг. использовался агрегат из двух автомобильных 6-цилиндровых дизелей GMC-71 мощностью 210 л.с. каждый.

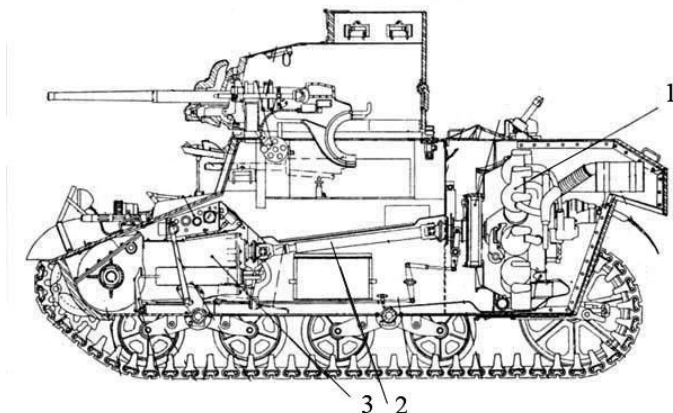


Рис. 7.7. Компоновка легкого танка М3 «Генерал Стюарт» (США, 1942 г.). Применение звездообразного авиамотора (1) и переднее расположение трансмиссии (3), что вынуждает расположить внизу машины карданный вал (2), делает танк очень высоким.

Во Франции предпочтение было отдано танкам сопровождения, имевшим совсем малую скорость, и мощность карбюраторных танковых двигателей даже у тяжелых машин не превышала 200 л.с. Исключением являлся легкий танк FCM 36, на котором устанавливался V-образный четырехцилиндровый дизель мощностью всего около 100 л.с., выпускаемый фирмой «Берлье» по лицензии английской фирмы «Рикардо».

Как ни странно, большее применение дизели нашли в Японии и Италии, танкостроение которых отставало от других стран. Сами по себе японские и итальянские танки создавались уже устаревшими и не сыграли во Второй мировой войне какой-либо значительной роли. Что касается двигателей, то у японцев это был 6-цилиндровый тракторный дизель «Мицубиси» воздушного охлаждения мощностью 120 л.с., а у итальянцев – 8-цилиндровый автомобильный дизель SPA 8-TV мощностью 125 л.с. при 1800 об/мин.

Несмотря на то, что в Германии производство дизелей было развито хорошо, немцы в ходе Второй мировой войны не стали устанавливать их на танки, хотя дизель фирмы «Даймлер – Бенц» MB-507 мощностью 720 л.с. и был в 1942 г. успешно испытан на танке. Однако двигатель имел слишком большие габариты. Кроме того Германия испытывала большую нехватку дизельного топлива. Используемые немцами отличные танковые моторы «Майбах» HL120TR мощностью 300 л.с. (для средних танков Pz. III и Pz. IV) и Майбах HL230P45 в 700 л.с. (тяжелые Pz. VI «Тигр» и Pz. V «Пантера») могли работать на низкосортном синтетическом бензине, вырабатываемом из каменного угля, и были менее пожароопасными, чем авиационные. Кроме того немцы оснащали свои танки системой пожаротушения и отделяли топливные баки от боевого отделения внутренней броневой перегородкой, что понижало опасность для экипажа. Основным недостатком применения в немецких танках бензиновых моторов стал малый запас хода, который, например, у «Тигра» не превышал 100 км. Дело в том, что при большей экономичности применение дизеля позволяет размещать снаружи еще и дополнительные топливные баки. Попытки же навесить дополнительно на танк канистры с бензином делают его небоеспособным.

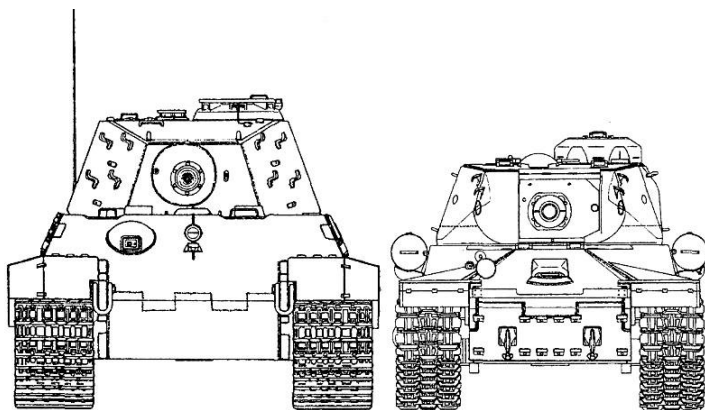


Рис. 7.8. Сравнение фронтальной проекции тяжелых танков Pz. VI В «Королевский тигр» (Германия, 1944 г.) и ИС-2 (СССР, 1944 г.). Применение компактного дизеля В-2ИС и заднее расположение трансмиссии позволило советским конструкторам создать танк с более мощным вооружением, масса которого в полтора раза меньше массы немецкого танка при аналогичном бронировании.



Что касается танкового дизеля В-2, то, безусловно, он был пущен в производство очень «сырым», его истинный моторесурс составлял всего 50 – 60 часов. Больше всего беспокоили топливная аппаратура и система воздухоочистки, а на третьем месте стояли проблемы вибраций. Однако в условиях военного времени достоинства техники определяются не только ее моторесурсом, но в первую очередь боевыми возможностями, простотой обслуживания, технологичностью производства, а эти качества у советских танков были на высоком уровне. В годы войны дизель В-2 постоянно совершенствовался и его моторесурс был существенно повышен.

Успехи советских танкостроителей в годы войны во многом обусловлены применением для средних и тяжелых машин дизельного двигателя семейства В-2, созданного также на ХПЗ в 1930-е гг. Дизельный мотор В-2 по праву можно считать выдающимся достижением отечественного машиностроения. Созданный в предвоенные годы, он производился во многих вариантах до начала семидесятых годов, а суммарный его выпуск превысил четверть миллиона единиц. Дизель В-2 служил не только в танках, его модификации устанавливались на тягачах и кораблях, а также использовались в промышленных силовых установках. Двигатели, являющиеся его развитием, использовались в танках Т-44, Т-54, ПТ-76, Т-55, Т-62, ИС-4, Т-10 и др. (см. табл. 7.1). Современные российские танковые дизели являются также развитием В-2. Они имеют ту же размерность – диаметр цилиндра 150 мм, ход поршня 180 мм у основного шатуна и 186,7 мм – у прицепного.

#### **7.4. Создание танковых дизелей серии ТД на Харьковском заводе транспортного машиностроения им. В. А. Малышева**

В то время как танковые заводы Российской Федерации в 1960-е гг. делали ставку на V-образный дизель, в Харькове на ХЗТМ им. В. А. Малышева был создан танковый дизель нового поколения – 5ТДФ, имевший уникальные характеристики. Двигатель, опередивший свое время, стал основой для создания семейства двигателей, предназначенных для бронетанковой техники, и определил пути ее развития в СССР, а позже и в независимой Украине.

История создания этого дизеля началась с разработки в ЦИАМе под руководством А. Д. Чаромского в 1948–1950 гг. проекта четырехцилиндрового двухтактного турбопоршневого высоко-

оборотистого авиационного дизеля М-305 со встречно движущимися поршнями и Х-образным расположением цилиндров и взлетной мощностью 1000 л.с. Проект не был реализован, так как авиационная промышленность перешла на газотурбинные двигатели. Тогда Алексей Дмитриевич решил заняться проектированием танковых дизелей. В 1952 г. его группа в ЦИАМе была выделена в научно-исследовательскую лабораторию двигателей, впоследствии преобразованную в научно-исследовательский институт двигателей. В качестве прототипа для создания нового танкового дизеля был взят М-305. Поскольку его компоновка не годилась для танка, был разработан эскизный проект рядного дизеля 4ТД. Этот проект не был реализован в металле, так как расчетная мощность двигателя оказалась недостаточной. После доработки проекта был добавлен еще один цилиндр, и в 1953 г. на заводе им. Малышева началась работа по созданию проекта нового пятицилиндрового танкового двигателя 5ТД. В июле 1955 г., после утверждения проекта, на ХЗТМ было организовано КБ по танковому двигателестроению – отдел 60Б. Главным конструктором двигателей был назначен А. Д. Чаромский, переехавший из Москвы в Харьков.



### *Алексей Дмитриевич Чаромский*

(1899 – 1982)

Родился 15 февраля 1899 г. в селе Чаромское (Шекснинский район Вологодской области). Участвовал в Великой Октябрьской Социалистической революции и Гражданской войне. В 1928 г. окончил военно-воздушную инженерную академию имени Н. Е. Жуковского. С 1928 года работал в научном автотомоторном институте, а затем в ЦИАМ. Занимался конструированием авиационных дизелей. Был необоснованно репрессирован и в 1938 – 1942 гг., находясь в заключении, работал в моторной группе особого техбюро НКВД. Лауреат Сталинской премии первой степени (1943 г.), генерал-майор инженерно-авиационной службы (1944 год), доктор технических наук (1953). В 1955 – 1960 гг. – главный конструктор КБ по танковому двигателестроению при ХЗТМ им. Малышева.

В 1958 г. дизель 5ТД успешно прошел испытания. Он имел рабочий объем всего 13,6 л и мощность 580 л. с. с возможностью дальнейшего форсирования. Его показатели по литровой и особенно по объемной мощности были для своего времени рекордными, сочетаясь при этом с высокой экономичностью. Под этот двигатель в КБ под руководством А. А. Морозова был создан новый танк – объект 430. Хотя танк и двигатель показали высокие качества, в серийное производство они не пошли, так как их тактико-технические характеристики не соответствовали новым повышенным требованиям. Но поскольку у нового двигателя были еще большие возможности для форсирования, разработка этой схемы продолжалась. В 1964 г. началось изготовление первых образцов дизеля 5ТДФ. Сначала оно происходило в цехах, выпускающих серийную продукцию, а в декабре 1965 г. приказом министра оборонной промышленности СССР С. А. Зверева при заводе им. Малышева было организовано самостоятельное подразделение – Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению (ХКБД). Отдел динамики и прочности в нем возглавил М. В. Блох. В 1966 г. дизель 5ТДФ успешно прошел 200-часовые межведомственные испытания (МВИ). За период его конструктивной и технической доводки с 1962 по 1967 гг. практически все узлы двигателя претерпели изменения.

В 1960 г. А. Д. Чаромский по состоянию здоровья вышел на пенсию и возвратился в Москву. Новым главным конструктором по танковому моторостроению стал Л. Л. Голинец.\* В 1964 г. началось изготовление первых образцов форсированной модификации дизеля 5ТДФ. Сначала оно происходило в цехах, выпускающих серийную продукцию, а в декабре 1965 г. приказом министра оборонной промышленности СССР С. А. Зверева при заводе им. Малышева было организовано самостоятельное подразделение – Харьковское конструкторское бюро по двигателестроению (ХКБД). В 1966 г. дизель 5ТДФ успешно прошел 200-часовые межведомственные испытания (МВИ). За период его конструктивной и технической доводки с 1962 по 1967 гг. практически все узлы двигателя претерпели изменения.

5ТДФ это рядный пятицилиндровый двигатель с горизонтальным расположением цилиндров, в каждом из которых находятся два

---

\* Леонид Леонидович Голинец (1927 – 2000). Выпускник Львовского политехнического института по специальности реактивные двигатели. С 1950 г. работает на ХЗТМ. Лауреат Ленинской премии за создание танка Т-64А. С 1973 г. заместитель главного конструктора ХЗТМ по дизелестроению

поршня, движущихся навстречу друг другу. Между поршнями при их максимальном сближении образуется камера сгорания. В стенках каждого цилиндра имеются: с одной стороны продувочные окна, а с другой – выпускные. Продувочные окна служат для пуска в цилиндры свежего воздуха, а выпускные обеспечивают выпуск из цилиндра отработавших газов. Поршни помимо своего прямого назначения управляют открытием и закрытием продувочных и выпускных окон, т. е. выполняют функции газораспределительного механизма. Каждый из поршней посредством шатуна связан со своим коленчатым валом. В связи с этим, поршни, управляющие продувочными окнами, а также связанный с ними коленчатый вал называются впускными (продувочными), а поршни, управляющие выпускными окнами и их коленчатый вал – выпускными (выхлопными). Поскольку продувочный коленчатый вал отстает по углу поворота от выхлопного на  $10 - 12^\circ$ , мощность, снимаемая с него, составляет только 30 % мощности двигателя.

Коленчатые валы связаны друг с другом главной передачей, состоящей из пяти зубчатых колес, что задает одинаковое направление их вращения. Для разгрузки выполненного из алюминиевого сплава блока цилиндров от растягивающих усилий картеры коленчатых валов соединены между собой шестью парами стальных анкерных болтов.

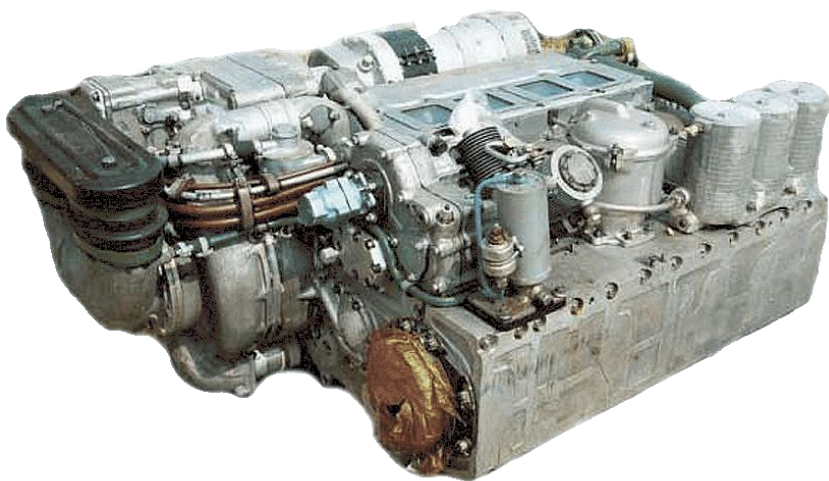


Рис. 7.9. Дизель 5ТДФ

Двигатель имеет турбонаддув с комбинированной связью компрессора (нагнетателя), газовой турбины и коленчатого вала. Турбина, вращающая вал компрессора, работает от энергии выхлопных газов, а в случае ее нехватки снимает мощность с главной передачи. Это использование энергии отработавших газов повышает экономичность двигателя, а турбонаддув позволяет увеличить количество подаваемого в цилиндры топлива и тем самым существенно повысить мощность двигателя.

Сложнейшую проблему осуществления силовой связи между находящимися с разных сторон двигателя турбиной и компрессором блестяще решил конструктор Г. А. Волков, предложивший сделать ее в виде соединения, расположенного внутри кулачкового вала топливных насосов. Привод состоит из трех тонких валов (рессор), последовательно соединенных между собой стальными цементированными шлицевыми втулками, вращающимися в бронзовых подшипниках скольжения, расположенных в расточке кулачкового вала [4].

Среди систем 5ТДФ по красоте решения выделяется привод стартер-генератора, представляющий собой гидромеханическую передачу с автоматическим изменением передаточного отношения при переходе из стартерного режима в генераторный. Чтобы преодолеть динамические нагрузки, возникающие в приводе во время пуска, а также в различных ситуациях, характерных для эксплуатации танкового дизеля, потребовались годы упорных усилий.

Двигатель имеет рабочий объем всего 13,6 л и мощность 700 л.с. с возможностью дальнейшего форсирования. Его показатели по литровой и особенно по объемной мощности были для своего времени рекордными, сочетаясь при этом с высокой экономичностью. Главными достоинствами нового дизеля были малая высота – всего 581 мм и двухсторонний отбор мощности. Уникальные массогабаритные характеристики 5ТДФ позволили создать компактное моторно-трансмиссионное отделение (МТО), что в целом очень благоприятно повлияло на компоновку всего танка. Плоский двигатель позволил разместить радиаторы систем охлаждения и смазки над ним, в крыше МТО и, несмотря на это, снизить высоту танка до 2,17 м. Для сравнения, современные ему танки других стран имеют высоту не менее 2,7 м [14]. Съём мощности с двух сторон выпускного коленчатого вала позволил радикально изменить компоновку МТО и отказаться от главного и бортовых фрикционов. Танк оснащен двумя планетарными коробками перемены передач (КПП) и планетарными бортовыми передачами. Повороты осуществляются включением в КПП отстающего борта или нейтральной передачи, или передачи на ступень ниже, чем в опережающем.

Первоначально планировалось выпускать Т-64А не только в Харькове, но и на Ленинградском Кировском заводе и Уралвагон-заводе (УВЗ) (г. Нижний Тагил). Но поскольку ХЗТМ не обладал мощностями для обеспечения трех заводов танковыми дизелями и кроме того, дизель 5ТДФ имел еще много рекламаций по ресурсу, были разработаны запасные варианты танка с дизелем В-45, являющимся развитием знаменитого В-2. На основе этих проектов в России впоследствии был создан танк Т-72 с аналогичным вооружением и броневой защитой. Однако вследствие более объемного двигателя, танк имеет большие габариты, и его масса составила 46 т.

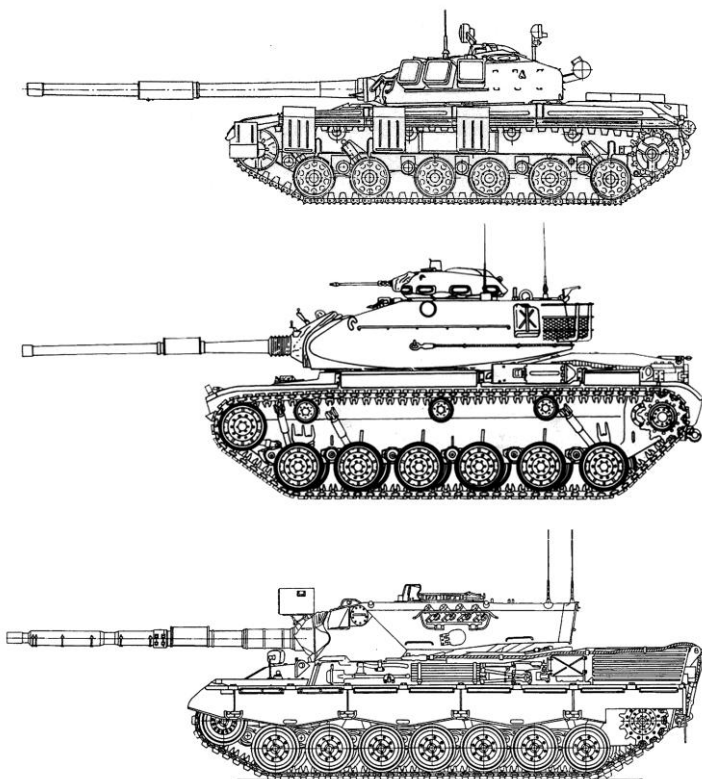


Рис. 7.10. Сравнение боковой проекции основных танков: 1) Т-64А (СССР, 1963 г.), 2) М60А1 (США, 1962 г.) 3) «Леопард 1» (ФРГ, 1965 г.). За счет применения плоского двигателя 5ТДФ масса и габариты советского танка значительно меньше при более мощном вооружении и бронировании.

Внедрение в танкостроении нового семейства двухтактных дизелей со встречно движущимися поршнями создало очень много проблем. Среди них не последнее место занимают проблемы вибраций. Тогда разработчики двигателя вынуждены были обратиться за помощью в ХПИ. Все расчеты колебаний дизелей 5ТДФ и 6ТД проводились в ХПИ в группе силовых передач проблемной лаборатории динамики и прочности машин, которую возглавлял профессор Л. И. Штейнвольф [10].



*Лев Израилевич Штейнвольф*

(1916 – 1991)

Известный ученый в области механики, динамики машин и прикладной теории колебаний, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической механики ХПИ. Выпускник ХММИ по специальности динамика машин (1939), ученик Я. М. Майера и И. М. Бабакова. Основное направление исследований – динамика силовых установок с ДВС. Руководил в ХПИ научно-исследовательской группой силовых установок в Проблемной лаборатории по динамике и прочности машин [1].

При создании дизеля 5ТДФ предполагалось, что он будет развивать мощность 1 000 л.с. при 3 000 об/мин. Однако в конце рабочего диапазона возникал резонанс крутильных колебаний, кроме того, двигатель оказался перегружен. В результате пришлось ограничить максимальные обороты (2 800 об/мин) и снизить мощность до 700 л.с. Однако в последующие годы мощность дизеля 5ТДФ была повышена сначала до 750, а затем и до 840 л.с.

В 1960-е гг. в США были начаты работы по созданию танкового ГТД. В декабре 1966 г. появились сообщения, что фирма «Лайкоминг» начала испытания ГТД мощностью 1500 л.с. Следует отметить, что еще в конце 1940-х гг. на Ленинградском Кировском заводе разрабатывался проект тяжелого танка с газотурбинным двигателем. Впоследствии, несмотря на достигнутые успехи, работы по созданию

танкового ГТД были прекращены в связи остановкой работ по тяжелым танкам.

Когда о создании в США танкового ГТД узнали у нас, несмотря на то, что ведущие европейские танкостроительные державы – Германия, Англия и Франция отдали предпочтение поршневому двигателю, 16 апреля 1968 г. ЦК КПСС и Совмином СССР было принято решение о создании газотурбинного танка. С этого момента началась история танка Т-80. Уже в мае 1969 г., новый ГТД установили на опытный образец танка. В 1970г. Калужскому моторостроительному заводу было поручено освоение серийного производства танкового двигателя ГТД-1000Т, разработанного НПО им. В. Я. Климova.

ГТД имеет ряд преимуществ перед дизелем, а именно:

- отсутствие системы водяного охлаждения;
- уменьшенной теплоотдачи в масло и малого его расхода;
- уменьшенной вибрации в связи с отсутствием возвратно-

поступательных частей;

- лучшего коэффициента приспособляемости;
- незаглохаемости при возникновении внезапного сопротивления.

Однако ГТД имеет и ряд непреодолимых недостатков:

- расход топлива в 1,5 – 1,7 раза больше, чем у поршневых двигателей;

- высокая стоимость;

- отсутствие резервных средств пуска;

- двигатель не приспособлен к работе в условиях повышенной запыленности;

- большие потери мощности при повышении температуры окружающей среды;

- низкая тормозная мощность.

Конструкторы ХЗТМ и УВЗ отказались от идеи использования газотурбинного двигателя в танке, а на Кировском заводе был создан основной боевой танк Т-80. Этот первый в мире серийный танк с единой газотурбинной силовой установкой поступил на вооружение Советской армии в 1976 г. Таким образом, на вооружении оказалось три основных танка с примерно одинаковыми характеристиками. Однако жизнь показала, что улучшить топливную экономичность танка с ГТД и снизить его стоимость невозможно.

Несмотря на то, что сторонники ГТД во главе с Секретарем ЦК КПСС по обороне Д. Ф. Устиновым всячески пытались помешать дальнейшим работам над танковыми дизелями, в 1975 г. на ХКБД



развернулись работы по созданию на базе 5ТДФ шестицилиндрового дизеля. Работы возглавил Н. К. Рязанцев, назначенный в 1973 г. генеральным конструктором и начальником ХКБД. Кроме добавления шестого цилиндра, для размещения которого в танке имелись резервы пространства, была также увеличена цилиндровая мощность за счет увеличения турбонаддува. На создание нового дизеля, получившего наименование 6ТД-1, с момента выпуска чертежей до МВИ, проведенных в 1979 г. ушло всего четыре года. Параллельно ХЗТМ совместно с сотрудниками ХКБД выполнили ОКР по созданию моторно-трансмиссионной установки с новым дизелем.



*Николай Карпович Рязанцев*

(1937 – 2007)

Родился 30 апреля 1937 г. в Донбассе. В 1959 г. окончил ХПИ по специальности ДВС. С 1965 г. работает в ХКБД. Генеральный конструктор, доктор технических наук, профессор, почетный доктор НТУ «ХПИ», заслуженный деятель науки и техники Украины, Лауреат Государственной премии Украины. Николай Карпович ушел из жизни 17 мая 2007 года.

Еще через шесть лет в двигателях семейства ТД все-таки удалось достичь цилиндровой мощности 200 л.с. – новый двигатель 6ТД-2 развивал мощность 1 200 л.с., а модернизированный 5ТДФМ – 1 000 л.с. Это стало возможно благодаря применению более мощной турбины в системе питания воздухом. Хотя обороты этих двигателей достигают 3 000 в минуту, максимальная мощность развивается на режиме 2 600 об/мин. Дизели 6ТД устанавливаются в новых танках Т-80УД и Т-84, успешно конкурирующих с лучшими образцами танков на мировом рынке вооружений. Они также позволили заняться радикальной модернизацией танкового парка, причем не только повысить мощность Т-64, но заменить V-образные дизели в машинах российского производства Т-72, а также самого многочисленного за всю историю мирового танкостроения Т-55. Модернизация проводится не только для армии Украины, но и для иностранных армий, что позволяет обеспечить ХЗТМ заказами.

С обретением Украиной самостоятельности были нарушены связи со странами, поставлявшими различные боевые и транспортные машины, а также двигатели к ним. Поэтому для замены вышедших из строя двигателей автобусов «Икарус», боевых машин пехоты (БМП), бронетранспортеров и другой техники срочно понадобились двигатели, мощность и габариты которых меньше танковых. Для этих целей на базе дизелей 6ТД-1 и 6ТД-2 был разработан новый модельный ряд трехцилиндровых двигателей. Дизели 3ТД выпускаются в четырех основных вариантах с мощностью от 280 до 600 л.с.

Модельный ряд малолитражного дизеля 3ТД успешно применяется как в транспортных, так и в боевых машинах. В частности, замена в бронетранспортерах БТР-60, БТР-70 и БТР-80 двух бензиновых двигателей на более мощный дизель позволяет продлить срок службы этих машин. Кроме того, применение дизелей 3ТД позволило создать отечественные бронетранспортеры БТР-3 и БТР-4, которые по своим характеристикам близки к БМП. Применение дизелей семейства ТД для создания новой и модернизации существующей бронетанковой техники приводится в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Танковые двигатели семейства ТД

Марка двигателя	Год	Мощность, л.с.	Режим, об/мин	Машины
5ТД	1958	580	3 000	Объект 430
5ТДФ	1969	700	2 800	Т-64, Т-64А, Т-64Б, Т-64БВ
	1971	750		
6ТД-1	1979	1 000	2 800	Т-64АМ, Т-64БМ, Т-80УД
6ТД-2	1985	1 200	2 600	Т-84
5ТДФМ	1986	1 000	2 600	Т-64АГ, Т-55АГМ
3ТД-1	1990-е	280	2 600	Автобусы, БТР, БМП
3ТД-2		400		
3ТД-3		500		
3ТД-4		600		



Танк Т-64 БВ



Танк Т-84



БМП-3



БТР-80

Рис. 7.11. Боевые машины, оснащенные дизелями серии ТД

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев Ю. М. Вековой юбилей профессора Льва Израилевича Штейнвольфа / Ю. М. Андреев, Е. И. Дружинин, А. А. Ларин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 26 (1198). – С. 27–31
2. Дроботенко А. П. Рожденный на ХПЗ. (Историко-технический очерк.) / А. П. Дроботенко – Х.: ЧП Юшко, 2004. – 170 с.
3. Зубов Е. А. Двигатели танков (из истории танкостроения) / Е. А. Зубов – М.: НТЦ «Информтехника», 1991. – 112 с.
4. История двигателестроения на ХПЗ – заводе имени Малышева. 1911–2001. Историко-технические очерки о двигателях и их создателях. – Х: Митець, ГП Завод имени Малышева, 2001. – 480 с.
5. Ларин А. А. Жизненный и творческий путь профессора Юрия Аркадьевича Гоппа / А. А. Ларин // Омский научный вестник, 2013. – № 2 (120) – С. 40–44
6. Ларин А. А. История науки и техники: учебник / А. А. Ларин // Х.: НТУ «ХПИ», 2018. – 285 с.  
Ел. ресурс: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/38092>
7. Ларин А. А. Очерки истории развития теории механических колебаний – Севастополь: Вебер, 2013. – 403 с.
8. Ларин А. А. Танки Второй мировой войны Харьков, Белгород: Книжный Клуб «Клуб Семейного досуга», 2013, 400 с.
9. Ларин А. А. Танкостроение в Харькове. / А. А. Ларин // Universitates. Наука и просвещение, 2013, № 1 – 4
10. Ларін А. О. Дослідження коливань танкових дизелів сімейства ТД (історія питання). / А. О. Ларін // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» № 670 «Держава та армія». – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2010. – С. 199–205
11. Ларін А. О. Співпраця Харківського політехнічного інституту з Турбоатомом в області динаміки і міцності машин / А. О. Ларін, С. О. Меньшиков // Питання історії науки і техніки, 2012. – № 4. – С. 57–63

12. Моисеев Н. Н. Математика ставит эксперимент / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1979. – 224 с.
13. Радциг А. А. История теплотехники / А. А. Радциг. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1936. – 430 с.
14. Рязанцев Н. К. Этапы развития отечественного танкового двигателестроения. Оценка эффективности 2-х и 4-х тактных танковых дизельных двигателей / Н. К. Рязанцев, В. Ф. Климов, С. В. Волков // Механіка та машинобудування. – Вип. 1, 2002. – С. 35–40
15. ХПЗ – Завод имени Малышева. 1895-1995. Краткая история развития / [ А. В. Быстриченко, Е. И. Добровольский, А. П. Дроботенко и др. ]. – Х. : Прапор, 1995. – 792 с.
16. Шершов А. П. История военного кораблестроения. / А. П. Шершов. - СПб. : Полигон, 1994. – 360 с.

Навчальне видання

ЛАРІН Андрій Олексійович  
ЖУРИЛО Дмитро Юрійович

## **Історія теплотехніки**

навчальний посібник

російською мовою

В авторській редакції

В авторській редакції

Роботу до видання рекомендував Д. В. Бреславський

Підп. до друку 17.02.18. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.  
Riso-друк. Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 5,8.  
Ціна договірна